

Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 2. С. 82–90

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.194

DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.82-90

ОЦЕНКА УРОВНЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ Г. УФЫ (РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

Леонид Иванович Соколов, Янгузель Гумеровна Ишмухаметова

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе;
г. Москва, Российская Федерация

Выполнена оценка уровня антропогенной нагрузки на водные объекты бассейнов рек Уфы и Белой в контексте обеспечения биосферной совместимости хозяйственной деятельности человека с природными процессами. Установлены удельные комбинаторные индексы загрязненности рек. При этом использовались показатели нагрузки загрязнителями сточных вод промышленных предприятий и города в сравнении с нормативами допустимых сбросов. Продемонстрировано критическое состояние водных экосистем региона. Показано, что р. Уфа и р. Белая в целом, а также их основные притоки характеризуются высокими значениями антропогенной нагрузки, относятся к категории «грязных» и испытывают водный стресс в маловодные годы. Выявлено значительное превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по ряду показателей (медь, марганец, нефтепродукты). Рассчитан коэффициент использования водного ресурса реки. Предложена формула модифицированного показателя водного стресса реки. Разработаны критерии отбора схем биологической очистки для малых населенных пунктов и установлена их приоритетность. Биосферная значимость исследования определяется разработкой критериев отбора экологически совместимых технологий очистки сточных вод для малых населенных пунктов. Предложены приоритетные схемы биологической очистки, основанные на принципах естественного самоочищения и минимизации негативного воздействия на экосистему.

Ключевые слова: водные объекты, сточные воды, антропогенная нагрузка, индекс загрязненности вод, водный стресс

Для цитирования: Соколов Л.И., Ишмухаметова Я.Г. Оценка уровня антропогенной нагрузки на водные объекты г. Уфы (Республика Башкортостан) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2026. № 2. С. 82–90. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.82-90

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF ANTHROPOGENIC LOAD ON WATER BODIES IN UFA (RESPUBLIKA OF BASHKORTOSTAN)

Leonid I. Sokolov, Yanguzel G. Ishmukhametova

Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze; Moscow, Russian Federation

The assessment of the level of anthropogenic load on the water bodies of the Ufa and Belaya river basins in the context of ensuring the biospheric compatibility of human economic activity with natural processes has been carried out. Specific combinatorial indices of river pollution have been established. At the same time, indicators of the pollutant load of wastewater from industrial enterprises and the city were used in comparison with the standards of permissible discharges. The critical state of the region's aquatic ecosystems is demonstrated. It is shown that R. Ufa and the Belaya River as a whole, as well as their main tributaries, are characterized by high values of anthropogenic load, belong to the category of "dirty" and experience water stress in low-water years. A significant excess of the MPC was revealed for a number of indicators (copper, manganese, petroleum products), and the utilization rate of the river's water resource was calculated. A formula for a modified indicator of the river's water stress is proposed. Criteria for the selection of biological treatment schemes for small settlements have been developed and their priority has been established. The biospheric significance of the study is determined by the development of criteria for the selection of environmentally compatible wastewater treatment technologies for small settlements. Priority schemes of biological purification are proposed, based on the principles of natural self-purification and minimizing the negative impact on the ecosystem.

Keywords: water bodies, wastewater, anthropogenic load, water pollution index, and water stress

For citation: Sokolov L.I., Ishmukhametova Ya.G. Assessment of the level of anthropogenic load on water bodies in Ufa (Respublika of Bashkortostan). Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology. 2026; 2:82-90. DOI: 10.22227/2311-1518.2026.2.82-90 (rus.).

Введение

В настоящее время проблема загрязнения водных объектов активно исследуется как отечественными, так и зарубежными учеными. Международные исследования фокусируются на разработке показателей

оценки антропогенной нагрузки и методов минимизации загрязнений [1–5]. Отечественные исследования направлены на совершенствование методологии оценки качества водных объектов и разработку эффективных технологий очистки сточных вод [6–8].

Исследование антропогенной нагрузки на водные объекты г. Уфы является крайне актуальным в современных условиях, поскольку проблема загрязнения водных ресурсов приобретает глобальный характер. Особую значимость приобретает оценка состояния бассейна реки Уфы как важнейшего водного объекта Республики Башкортостан, испытывающего значительное техногенное воздействие.

Река Уфа Республики Башкортостан — главный и протяженный приток реки Белая, входит в число рек, относящихся к Камскому бассейновому округу. Общая протяженность реки Уфы составляет 969 км. Площадь ее водосбора составляет 52 500 км². На расстоянии 170 км от устья расположено Павловское водохранилище с полным объемом 1411 млн м³, площадью зеркала при нормальном подпорном уровне — 115,9 км², полезный — 952 млн м³, максимальный напор — 32,9 м. На качество воды Павловского водохранилища оказывают влияние организованные и неорганизованные стоки с рекреационных зон, с территории объектов нефтедобывающей промышленности и агропромышленного комплекса. Гидроузел водохранилища обеспечивает сезонное, недельное и суточное регулирование стока р. Уфы, аккумулируя до 16 % расхода весеннего половодья. Река огибает территорию г. Уфы с восточной и юго-восточной стороны. В нижнем течении реки Уфы возникают проблемы, связанные с ухудшением качества воды под действием промышленно-хозяйственной деятельности: самоочищающая способность ослабевает, сокращается биоразнообразие. В настоящее время в России оценку антропогенной загрязненности поверхностных вод проводят через расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности вод (УКИЗВ). За рубежом используется показатель — grey water footprint — объем чистой воды, необходимой для снижения, минимизации и нейтрализации нагрузки на водные объекты загрязнителями на основе их природных фоновых концентраций и существующих стандартов качества воды [2–4]. Минимизацию нагрузки, а значит снижение концентрации загрязняющих веществ можно провести путем разбавления свежей чистой водой до значений фоновых концентраций веществ в реке, либо до допустимых нормативами значений. Не исключается при этом возможность снижения степени нагрузки за счет смешения с водой собственно реки, а значит разбавления за счет других процессов, включающих самоочищающую способность реки.

Цель исследования: оценка антропогенной нагрузки на водные объекты г. Уфы путем определения индексов загрязненности и причин химического загрязнения водоисточников, обоснование приоритетных технологических схем очистки сточных вод

на сельскохозяйственных и городских территориях, включая промплощадки.

Предмет исследования — особенности сточных вод, обуславливающие трудности их качественной оценки при сбросе в водные объекты по данным гидромониторинга, проводимого специализированными организациями Республики Башкортостан.

Научная новизна исследования заключается в разработке модифицированного показателя деградации водного ресурса с учетом коэффициента загрязненности, создании критериев отбора схем биологической очистки для малых населенных пунктов, установлении приоритетности применения различных технологий очистки с учетом региональных особенностей и комплексном подходе к оценке водного стресса с учетом антропогенной нагрузки.

Модели и методы

Для исследования использовались данные мониторинга качества поверхностных вод Республики Башкортостан, ежегодники качества поверхностных вод по территории деятельности ФГБУ «Башкирское УГМС» и государственные доклады Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан. Основанием для оценки антропогенного воздействия от сбросов промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод в реку Уфу и ее притоки являются критерии безопасности (ПДК — предельно допустимые концентрации, ТН — технологические нормативы, НДС — нормативы допустимых сбросов, ВРС — временно разрешенные сбросы), которые формируют условия для обеспечения необходимого технологического состояния локальных очистных сооружений предприятий и канализационных очистных сооружений города [8–13].

Для оценки антропогенного воздействия на водные объекты бассейна реки Уфы выполнили расчеты УКИЗВ по РД 52.24.643–2002, что позволило установить класс загрязненности реки (1-й класс — условно чистая; 2-й класс — слабо загрязненная; 3-й класс — загрязненная; 4-й класс — грязная; 5-й класс — экстремально грязная), обобщить информацию о химическом составе речной воды, а также представить реальные результаты комплексной оценки степени ее антропогенной загрязненности при специфически полном наборе анализируемых показателей. В расчетах применяли значения рыбохозяйственных ПДК_{рх} [14–17]. УКИЗВ рассчитывали по формуле (1) для каждого притока реки Уфы и, собственно, в целом для реки с использованием для всех показателей в качестве пороговых значения ПДК:

$$\text{УКИЗВ} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot H_i, \quad (1)$$

где K_i — коэффициент относительной опасности сбрасываемого i -го загрязняющего вещества определяется по формуле $K_i = C_i / \text{ПДК}_{\text{рх}}$;

H_i — доля превышений концентраций сбрасываемого i -го загрязняющего вещества по формуле $H_i = N_{oi} / N_i$;

N_{oi} — количество случаев превышения ПДК_{рх} i -м сбрасываемым загрязняющим веществом из общего количества наблюдений N_i за сбросом данного вещества.

Контролировались 16 показателей качества вод реки и ее притоков, среди них: аммоний ион, БПК₅, взвешенные вещества, железо, марганец, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, сульфаты, фенолы, фосфаты, ХПК, хлориды, цинк. Методика исследования была построена на сравнении уровней антропогенных воздействий на водные объекты бассейна реки Уфы в 2017 и 2021 гг. [15–17].

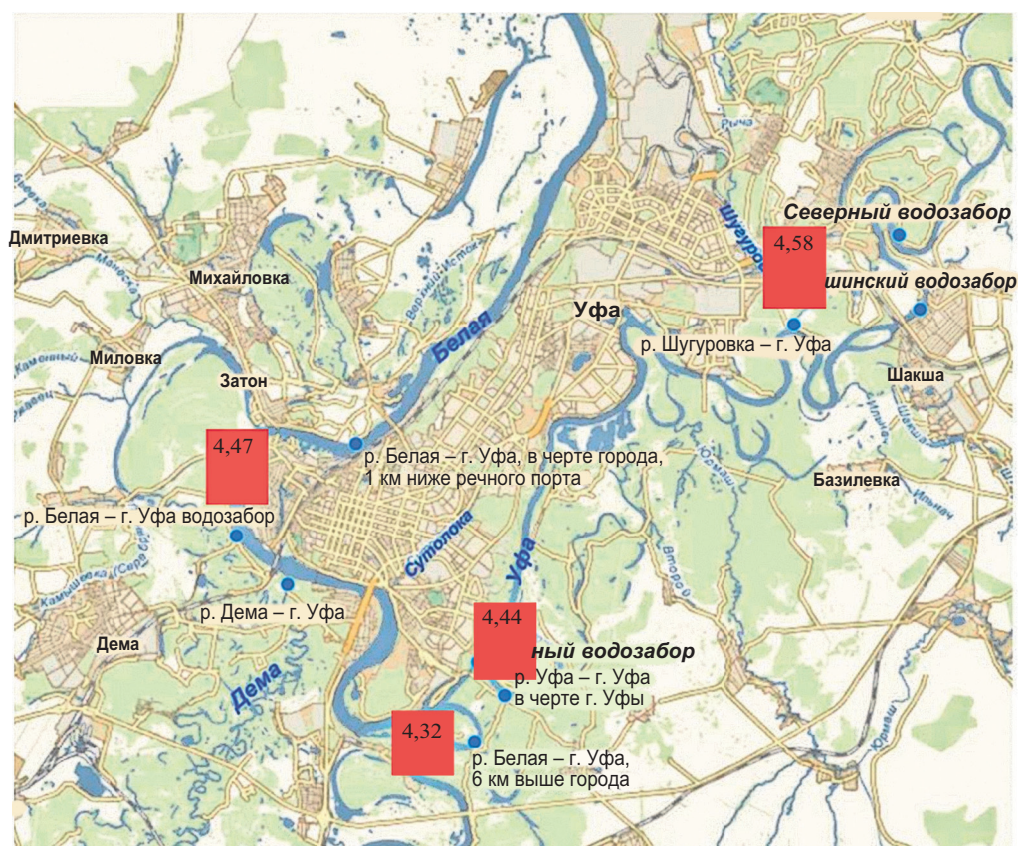
Результаты исследования и их анализ

По результатам исследований установлены значительные превышения ПДК_{рх} по БПК₅, фенолам, меди, нефтепродуктам, марганцу в контрольных створах рек Шугуровка, Юрюзань, Уфа.

Анализ полученных результатов показал, что исследуемые воды р. Уфы, ее притока р. Шугуровка, а также р. Белой относятся к классу «Грязная

4А» (табл. 1, 2). В табл. 2 представлены значения УКИЗВ, полученные с использованием ПДК и пороговых значений показателей загрязняющих веществ и рассчитанные для 2017 г. [15] в сравнении с 2021-м, 2023-м годами. Для всех исследованных водотоков УКИЗВ, рассчитанные с использованием ПДК, имеют критические показатели загрязненности. На карте представлены критические точки загрязнений с УКИЗВ в красных квадратах (рис.).

На качество воды реки в контрольном створе у г. Уфа оказывали влияние сточные воды предприятия ООО «Компания КРУС» (Строительство). В 2022 г. вода по качеству ухудшилась и перешла из 3-го класса разряда «Б» («очень загрязненная», 2021 г.) в 4-й класс разряда «А» («грязная»). Отмечен уровень загрязненности соединениями марганца в пределах 10 ПДК (средний) при возрастании максимального — с 15 до 29,2 ПДК; превышения нормативов фиксировались в 100 % проб. Возросли среднегодовые и максимальные концентрации соединений железа до 2 и 6 ПДК соответственно, в 43 % проб превышены нормативы. Максимальная концентрация соединений меди снизилась с 5 до 3 ПДК, количество случаев с превышениями ПДК со 100 до 71 % проб. В 29 % проб превышены нормативы по цинку до 4 ПДК. Также в 29 % проб превышены нормативы по соединениям азота нитритного. В 71 % проб обнаруживали превышения ПДК



Индексы загрязненности вод на карте бассейнов рек Белая и Уфа (значения индексов выделены на красных площадках)

Таблица 1. Качество воды в реке Уфа и ее притоках по показателям, превышающим нормативы

Пункт наблюдения	Показатель качества	Количество проб	ПДК _{рх}	Количество проб с превышением ПДК _{рх}	Превышение ПДК _{рх} , %
р. Уфа г. Уфа	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	62	2	6	7
	Фенолы, мг/дм ³	62	0,002	19	28
	Нефтепродукты, мг/дм ³	62	0,06	10	18
	Медь, мг/дм ³	62	1	41	74
	Марганец, мг/дм ³	62	10	49	79
р. Шугуровка г. Уфа	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	63	2	15	18
	Фенолы, мг/дм ³	63	0,002	22	38
	Нефтепродукты, мг/дм ³	63	0,06	15	26
	Медь, мг/дм ³	63	1	51	81
	Марганец, мг/дм ³	63	10	61	98
р. Юрюзань д. Чулпан	Нефтепродукты, мг/дм ³	35	0,06	12	42
	Медь, мг/дм ³	35	1	22	76

по сульфатам. Превышения концентраций органических веществ по ХПК, БПК₅ — не более 2 ПДК. Фенолы в пробах воды не обнаружены.

Качество воды в реке Шугуровка за шесть лет наблюдений не стабилизировалось и оценивается 4-м классом разряда «А» («грязная»). На качество воды оказывают влияние аварийные сбросы с предприятий ЖКХ и смывы с территории жилой и промышленной зон. В числе критического показателя загрязненности остаются соединения марганца по среднему уровню содержания в пределах 15 ПДК, по максимальному уровню — 24 ПДК. Среднегодовые и максимальные концентрации сульфатов фиксировали до 2 и 5 ПДК с повторяемостью нарушения нормативов в 57 % проб. Максимальные концентрации соединений азота аммонийного наблюдаются до 4 ПДК. До 2 ПДК составляют содержание органических веществ (ХПК и БПК₅), а также соединения железа, меди, цинка, азота нитритного и нитратного.

Качество воды реки Юрюзань наблюдалось в приграничном створе д. Чулпан. На качество воды оказывали влияние сточные воды ООО «Комус» (бывшие ООО «Коммунальные услуги») Салаватского района (Жилищно-коммунальное хозяйство), а также транзит загрязняющих веществ от сбросов сточных вод г. Усть-Катав Челябинской области. Качество воды улучшилось в пределах 3-го класса и перешло в разряд «А» («загрязненная»). Содержание в воде соединений железа установлено в пределах 3 ПДК, нарушения нормативов фиксировались в 67 % проб. Фон загрязненности соединениями меди составил до 3 ПДК. В 33 % проб превышены нормативы по соединениям цинка не более 2 ПДК. Трудноокисляемые органические вещества наблюдались по ХПК с превышениями нормативов в 67 % проб.

В указанных притоках реки Уфы и, собственно, в самой реке вода классифицируется как грязная, что свидетельствует об опасном уровне загрязнения и негативном влиянии предприятий ООО «Башнефть-Сервис НПЗ», ООО «Компания КРУС», ОАО «УКХП», ООО «Промоборудование» на экосистему реки. Высокие значения показателей сточных вод, сбрасываемых в водоемы, по нефтепродуктам, фенолу, тяжелым металлам свидетельствуют о недостаточно эффективной очистке на локальных очистных сооружениях предприятий, агропромышленного комплекса и на малых очистных сооружениях сельских населенных пунктов. В связи с этим был проведен анализ зарубежных технологий очистки сточных вод с целью выбора технологических схем очистных сооружений для малых населенных пунктов и сельской местности Башкортостана. В настоящее время ученые и специалисты-практики находятся в поиске методов очистки сточных вод, которые имеют меньшую стоимость, низкие энергозатраты и являются экологически чистыми, таких как естественные методы очистки и сочетание традиционных и натуральных способов в различных методах очистки. Самыми востребованными в мире считаются: модульные очистные сооружения на базе водно-болотных угодий, мембранные биореакторы, модульные биологические сооружения очистки, стабилизационные пруды, почвенные фильтры и использование водных растений. Затраты на очистку, связанные с естественными методами, значительно ниже, чем при использовании традиционных способов. Согласно работе [18], стоимость очистки 4,5 л сточных вод традиционными методами составляет 6,5 долларов США (порядка 530 руб.), в то время как стоимость очистки естественным методом для

Таблица 2. Бенчмаркинг показателей качества воды и загрязненности водных объектов

Перечень загрязнителей	Критерий оценки загрязненности		р. Уфа – г. Уфа в черте г. Уфы	р. Шугуровка – г. Уфа	р. Белая – г. Уфа, 6 км выше города	р. Белая – г. Уфа водозабор
	ПДК, мг/дм ³	ЛПВ*				
Хлориды, мг/дм ³	300	С.-т.	6,70	82,3	123	42,9
Сульфаты, мг/дм ³	100	С.-т.	75,2	266	120	88,4
ХПК, мг/дм ³	15	Общ. т.	25,7	19	35,4	26,0
БПК ₅ , мг/дм ³	2	Общ. т.	0,494	0,450	0,38	0,173
NH ₄ , мг/дм ³	0,4 по азоту	Т.	0,299	0,175	0,26	0,174
NO ₂ , мг/дм ³	0,02 по азоту	Т.	0,015	0,021	0,012	0,22
NO ₃ , мг/дм ³	9,1 по азоту	С.-т.	4,16	9,90	6,39	4,22
Железо общее, мг/дм ³	0,1	Органолептический	0,21	0,074	0,110	0,115
Медь, мг/дм ³	0,001	Т.	2,50	1,65	2,01	3,18
Цинк, мг/дм ³	0,01	Т.	3,06	2,40	6,01	3,40
Никель, мг/дм ³	0,01	Т.	12,3	5,87	1,01	10,2
Марганец, мг/дм ³	0,01	Т.	113	145	134	119
Фенолы, мг/дм ³	0,001	Р-х.	0,003	0,003	0,002	0,002
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	Р-х.	0,186	0,166	0,13	0,10
УКИЗВ 2017	–	–	4,44	4,58	4,32	4,47
Класс 2017	–	–	Грязная 4А	Грязная 4А	Грязная 4А	Грязная 4А
УКИЗВ 2021	–	–	3,67	4,41	3,17	2,74
Класс 2021	–	–	Грязная 4А	Грязная 4А	Очень загрязненная 3Б	Очень загрязненная 3Б
УКИЗВ 2023	–	–	2,55	3,79	2,87	2,74
Класс 2023	–	–	Загрязненная 3	Грязная 4	Очень загрязненная 3	Очень загрязненная 3Б

ЛПВ* — лимитирующие показатели вредности: С.-т. — санитарно-токсикологический; Общ. т. — общие требования; Т. — токсикологический; Р-х. — рыбохозяйственный.

такого же объема сточных вод составляет 0,6 доллара США.

Стабилизационные пруды представляют из себя каскад из аэробных, анаэробных и факультативных резервуаров в земляном грунте, где происходит очистка стоков за счет водных и водно-болотных микроорганизмов (бактерии, фитопланктон и зоопланктон), крупных растений. При этом из сточных вод удаляется до 94 % общего азота, до 93 % нитратного азота и до 96 % аммонийного азота [19–21].

В очистных сооружениях на базе водно-болотных угодий обеспечивается фильтрация стока через заросли болотных растений, таких как камыш, рогуз и канареечник. Кроме того, процесс фильтрации сопровождается прохождением стока через проницаемые перегородки из земли, щебня и песка. Сточные воды наносятся поверх песка или щебня, затем постепенно фильтруются через фильтрующий субстрат, при этом изменение температуры влияет на эффективность очистки. При непрерывной очистке сточных вод удаление загрязняющих веществ происходит за счет деятельности расте-

ний и микроорганизмов в корневой зоне растений. Растительность обеспечивает микроорганизмы кислородом, что очень важно для их метаболической активности в корневой зоне и обеспечивает расщепление, окисление загрязняющих веществ. В качестве опции естественной очистки сточных вод часто используют также размещенные в воде такие растения, как водяной гиацинт, рдест, ряска, тростник, которые поглощают органические загрязнители. В почвенных фильтрах сама почва играет роль естественной первичной и вторичной очистки стока. Этот метод очистки требует меньших затрат.

Анализируя работу указанных сооружений, была рассчитана эффективность их применения по задержанию загрязнителей (табл. 3).

Несмотря на то что естественные методы обеспечивают высокую эффективность удаления загрязняющих веществ, на производительность существенно влияют сезонные колебания климата. Учитывая климатические условия Башкортостана, для малых населенных пунктов были рекомендованы в данной работе модульные биологические сооружения. Для

Таблица 3. Эффективность очистки сточных вод малых населенных пунктов на различных сооружениях (расчетные данные авторов)

Загрязнители	Эффективность биологических очистных сооружений, %		
	Модульные на базе водно-болотных угодий	Мембранные биореакторы	Модульные
Взвешенные вещества	90–93,3	80	92
Азот аммонийный	71–84	Не определялся	75
Фосфор фосфатов	68	Не определялся	55
ХПК	90	82	69
БПК ₅	90–98	79	94

Таблица 4. Определение коэффициента загрязненности водотоков $K_{\text{загр}}$ в зависимости от УКИЗВ

Класс и разряд водотоков	Характеристика состояния загрязненности воды	УКИЗВ	$K_{\text{загр}}$
1-й	Условно чистая	0,136–1,08	1
2-й	Слабо загрязненная	1,09–3,4	1,1–1,4
3-й	Загрязненная	3,5–6,4	1,5–1,7
Разряд «А»	Загрязненная	6,5–7,4	1,8–1,9
Разряд «Б»	Очень загрязненная	7,5–9,0	2,0–2,1
4-й	Грязная	9,1–9,5	2,2–2,3
Разряд «А»	Грязная	9,6–9,9	2,4–2,5
Разряд «Б»	Грязная	10,0–10,3	2,6–2,7
Разряд «В»	Очень грязная	10,4–10,8	2,8–2,9
Разряд «Г»	Очень грязная	10,9–11,5	3,0–3,1
5-й	Экстремально грязная	> 11,6	3,2–3,3

сельской местности были разработаны критерии отбора схем биологической очистки в следующей приоритетности: эффективность очистки, соблюдение НДС, ТН, ПДК; климатические условия (жаркий и сухой или сухой и влажный, умеренный и влажный, холодный климат); расход сточных вод; финансовые ресурсы для строительства и дальнейшей эксплуатации; простота эксплуатации и небольшая численность квалифицированного персонала; обеспечение критериев и стандартов утилизации осадка; возможность повторного использования сточных вод.

Была оценена также степень водного стресса (water stress) реки Уфы, для этого определено отношение объема водопотребления $Q_{\text{потр}}$ (438,74 млн м³ в год) к расходу водных ресурсов соответствующей обеспеченности $Q_{\text{рек}}$, учитывая минимальную водность реки в меженный период по формуле:

$$WS = (Q_{\text{потр}}/Q_{\text{рек}}) \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Коэффициент использования водного ресурса реки при среднегодовом расходе 388 м³/с для Уфы составляет 3,59 % с максимальными значениями до 25,3 % в маловодные годы (55 м³/с). Оценка степени водного стресса с применением коэффициента использования водного ресурса реки не всегда дает объективный результат, так как не учитываются показатели промышленных и хозяйственно-бытовых сбросов сточных вод в реку, а также региональные особенности исследуемых водных объектов,

в том числе значения фоновых концентраций загрязняющих веществ и значения индексов загрязненности вод. Поэтому была разработана таблица (табл. 4) соответствия класса и разряда загрязненности водных объектов коэффициенту загрязненности воды в них $K_{\text{загр}}$ в зависимости от УКИЗВ для определения модифицированного показателя деградации водного ресурса WS_a :

$$WS_a = WS \cdot K_{\text{загр}}, \quad (3)$$

где WS — водный стресс по формуле (2);

$K_{\text{загр}}$ — коэффициент загрязненности вод в зависимости от УКИЗВ.

С учетом этих показателей водный стресс как модифицированный показатель деградации водного ресурса объекта, в частности реки Уфы, может достигать 5,4 %, а в маловодный период — 38 %.

Выводы

В результате проведенного исследования впервые разработан модифицированный показатель водного стресса реки с учетом коэффициента загрязненности воды, что позволило более точно оценивать состояние водных объектов. Определены коэффициенты загрязненности водных объектов Республики Башкортостан в зависимости от УКИЗВ. По результатам исследований создана система инновационных критериев отбора схем биологической

очистки для малых населенных пунктов с учетом региональных особенностей и установлена приоритетность применения различных технологий очистки сточных вод. Научно обоснованы новые методики расчета деградации водного ресурса, а также принципы построения экологически совме-

стимых систем очистки для малых населенных пунктов. Предложена новаторская концепция построения экологически совместимых систем очистки, базирующаяся на принципах биосферной совместимости, минимальном воздействии на природную среду и максимальной эффективности очистки сточных вод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris : UNESCO, 2015. 122 p.
2. Hoekstra Arjen Y. Sustainable, efficient and equitable water use: the three pillars under wise freshwater allocation // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 31–40.
3. Pellicer-Martinez F., Martinez-Paz J.M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain // Ecological Indicators. 2016. Vol. 60. Pp. 1173–1183.
4. Wu B., Zeng W., Chen H., Zhao Yu. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism // J. of Cleaner Production. 2016. Vol. 1. No. 4. Pp. 3138–3151.
5. Cazcarroa I., Duarteb R., Sanchez-Cholizb J. Downscaling the grey water footprints of production and consumption // J. of Cleaner Production. 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615010446>
6. Ишмухаметова Я.Г., Соколов Л.И. Оценка степени влияния сточных вод предприятий на водные объекты бассейна р. Уфы // Новые идеи в науках о Земле : мат. XVII Междунар. науч.-практ. конф. : тезисы докладов. В 9 т. М., 2025. С. 33–36.
7. Ишмухаметова Я.Г., Соколов Л.И. Оценка антропогенного воздействия на водные объекты бассейна реки Уфа // Перспективы экологического развития России и стран СНГ : мат. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., проводимой в рамках XXIII Уральской горно-промышленной декады. Екатеринбург, 2025. С. 75–81.
8. Соколов Л.И., Силинский В.А. Безопасная эксплуатация экосистемы при водоподготовке и очистке сточных вод, основанная на принципах ресурсосбережения и природоподобия // Безопасность жизнедеятельности. 2024. № 12 (288). С. 31–35.
9. Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. 2017. 628 p.
10. Collivignarelli M.C., Abbà A., Sorlini I., Torretta V., Benigna I. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants // Sustainability. 2018. Vol. 10 (1). P. 86. DOI: 10.3390/su10010086
11. Соколов Л.И., Силинский В.А. Водная безопасность региона // Управление техносферой : электрон. Журнал. 2024. Т. 7. Вып. 2. С. 319–337. URL: <https://technosphere-ing.ru> DOI: 10.34828/UdSU.2024.76.89.011
12. Соколов Л.И., Силинский В.А. Концепция региональной водной безопасности // Безопасность жизнедеятельности. 2024. № 10 (286). С. 18–25.
13. Соколов Л.И., Силинский В.А. Исследование проблем и особенностей безопасного функционирования при экологическом воздействии на водные объекты регионального уровня // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4. С. 12–20. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.12-20
14. Clasen T. Household water treatment and safe storage to prevent diarrheal disease in developing countries // Current Environmental Health Reports. 2015. No. 2 (1). Pp. 69–74. DOI: 10.1007/s4057201400339
15. Теплова Д.С. Загрязнение поверхностных вод в пределах г. Уфы // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : сб. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 23–25 ноября 2017 г. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 445–448.
16. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан. Уфа : Изд-во «Самрау», 2022. 329 с.
17. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно- допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года № 552.
18. Hunter R.G., Day J.W., Wiegman A.R., Lane R.R. Municipal wastewater treatment costs with an emphasis on assimilation wetlands in the Louisiana coastal zone // Ecol. Eng. 2019. No. 137. Pp. 21–25.
19. Stottmeister U., Wießner A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O. et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment // Biotechnol. Adv. 2003. No. 22. Pp. 93–117.

20. Duan R.B., Fedler C.B. Performance of a combined natural wastewater treatment system in West Texas // J. Irrig. Drain. Eng. 2010. No. 136. Pp. 204–209.
21. Hoekstra Arjen Y., Ashok K. Chapagain and Guoping Zhang. Water Footprints and Sustainable Water Allocation // Sustainability. 2016. No. 8 (1). P. 20. URL: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/1/20/htm>

Об авторах: **Леонид Иванович Соколов** — доктор технических наук, профессор кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; SPIN-код: 3010-5480, Scopus AuthorID: 55891692500, ORCID: 0000-0001-9635-8389; e-mail: sokolovli@mail.ru;

Янгузель Гумеровна Ишмухаметова — магистрант кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе**; 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; e-mail: ismuhametovaanguzel@gmail.com.

REFERENCES

1. WAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO, 2015; 122.
2. Hoekstra Arjen Y. Sustainable, efficient and equitable water use: the three pillars un-der wise freshwater allocation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2014; 1(1):31-40.
3. Pellicer-Martinez F., Martinez-Paz J.M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Ecological Indicators*. 2016; 60:1173-1183.
4. Wu B., Zeng W., Chen H., Zhao Yu. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism. *J. of Cleaner Production*. 2016; 1(4):3138-3151.
5. Cazcarroa I., Duarteb R., Sanchez-Cholizb J. Downscaling the grey water footprints of production and consumption. *J. of Cleaner Production*. Available online. 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615010446>
6. Ishmukhametova Ya.G., Sokolov L.I. Assessment of the degree of influence of wastewater from enterprises on water objects of the Ufa River basin. *New ideas in Earth sciences : Materials of the XVII International scientific and practical conference : abstracts of reports. In 9 volumes*. Moscow, 2025; 33-36. (rus.).
7. Ishmukhametova Ya.G., Sokolov L.I. Assessment of anthropogenic impact on water objects of the Ufa River basin. *Prospects for the Environmental Development of Russia and the CIS Countries : Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference held as part of the XXIII Ural Mining and Industrial Decade*. Yekaterinburg, 2025; 75-81. (rus.).
8. Sokolov L.I., Silinsky V.A. Safe operation of the ecosystem during water treatment and wastewater treatment, based on the principles of resource conservation and nature-like. *Life Safety*. 2024; 12(288):31-35. (rus.).
9. Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. 2017; 628.
10. Collivignarelli M.C., Abbà A., Sorlini I., Torretta V., Benigna I. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*. 2018; 10(1):86. DOI: 10.3390/su10010086
11. Sokolov L.I., Silinsky V.A. Water safety of the region. *Technosphere management : electron. Journal*. 2024; 7(2):319-337. URL: <https://technosphere-ing.ru> DOI: 10.34828/UdSU.2024.76.89.011
12. Sokolov L.I., Silinsky V.A. The Concept of Regional Water Security. *Life Safety*. 2024; 10(286):18-25. (rus.).
13. Sokolov L.I., Silinsky V.A. Research of Problems and Features of Safe Functioning under Environmental Impact on Regional-Level Water Objects. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technologies*. 2024; 4:12-20. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.12-20
14. Clasen T. Household water treatment and safe storage to prevent diarrheal disease in developing countries. *Current Environmental Health Reports*. 2015; 2(1):69-74. DOI: 10.1007/s4057201400339
15. Teplova D.S. Pollution of surface waters within Ufa. *Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Yurga, November 23-25, 2017*. Tomsk, TPU Publishing House, 2017; 445-448. (rus.).
16. State report on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan. Ufa, Samrau Publishing House, 2024; 329. (rus.).
17. On Approval of Water Quality Standards for water bodies of fisheries significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fisheries significance : Order No. 552 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016.
18. Hunter R.G., Day J.W., Wiegman A.R., Lane R.R. Municipal wastewater treatment costs with an emphasis on assimilation wetlands in the Louisiana coastal zone. *Ecol. Eng*. 2019; 137:21-25.

19. Stottmeister U., Wießner A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O. et al. Effects of plants and micro-organisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 2003; 22:93-117.
20. Duan R.B., Fedler C.B. Performance of a combined natural wastewater treatment system in West Texas. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2010; 136:204-209.
21. Hoekstra Arjen Y., Ashok K. Chapagain and Guoping Zhang. Water Footprints and Sustainable Water Allocation. *Sustainability*. 2016; 8(1):20. URL: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/1/20/htm>

About the authors: **Leonid I. Sokolov** — Doctor of technical sciences, Professor of the department of construction of water supply and sanitation systems and structures; **Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze**; 23 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117997, Russian Federation; SPIN-code: 3010-5480, Scopus AuthorID: 55891692500, ORCID: 0000-0001-9635-8389; e-mail: sokolovli@mail.ru;

Yanguzel G. Ishmukhametova — Master's student of the department of construction of water supply and sewerage systems and facilities; **Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze**; 23 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: ismukhametovaanguzel@gmail.com.