



УДК 628.316

doi: 10.55287/22275398_2026_58_82

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЁХ МУНИЦИПАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В ЭН-НАДЖАФЕ (ИРАК) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОДЫ ССМЕ-WQI

Х. М. Д. Алшукри^{*/**}
Н. С. Царев^{*}

* Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

** Университет Куфы, г. Эн-Наджаф

Аннотация

В настоящем исследовании проведена оценка экологической эффективности трёх муниципальных канализационных очистных сооружений (КОС), расположенных в районе Аль-Баракия, Эн-Наджаф, Ирак: КОС Old Al-Najaf, КОС Bio-Shaft и КОС Compact Unit, с использованием индекса качества воды Канадского совета министров по окружающей среде (ССМЕ-WQI). Отбор проб сточных вод осуществлялся ежемесячно из входящего и выходящего потоков в период с января по декабрь 2025 года. Оценка выполнялась по шести выбранным физико-химическим показателям: BOD₅, COD, TSS, pH, NH₃ и PO₄³⁻, в соответствии с иракскими стандартами качества воды (IQS, 2009).

Результаты показали, что сточные воды на входе всех трёх сооружений были отнесены к категории низкого качества, при значениях ССМЕ-WQI, равных 20,31, 21,85 и 21,60 для КОС Old Al-Najaf, КОС Bio-Shaft и КОС Compact Unit соответственно. После очистки качество воды на всех станциях улучшилось, однако степень этого улучшения различалась. Очищенные сточные воды Old Al-Najaf сохранили категорию низкого качества (44,17), тогда как на Bio-Shaft (76,93) и Compact Unit (71,76) качество повысилось до категории удовлетворительное.

Результаты описательной статистики очищенных сточных вод показали, что средние значения BOD₅, COD, TSS и pH в целом соответствовали иракским нормативным ограничениям, тогда как NH₃ и PO₄³⁻ оставались основными лимитирующими показателями, особенно для Old Al-Najaf и Compact Unit. В целом исследование подтверждает, что индекс ССМЕ-WQI является эффективным инструментом для оценки работы очистных сооружений и выявления различий в их эксплуатационном состоянии в условиях Ирака.

Ключевые слова

ССМЕ-WQI, муниципальные сточные воды, канализационные очистные сооружения, качество очищенных сточных вод, река Евфрат, Ирак, Эн-Наджаф.

Дата поступления в редакцию

19.03.2026

Дата принятия к печати

26.03.2026

Введение

Система водоснабжения и водоотведения Ирака в настоящее время сталкивается с нарастающими проблемами, связанными как с количеством, так и с качеством водных ресурсов. Это обусловле-

но низким уровнем годовых осадков, а также существенным снижением водности рек Тигр и Евфрат. Одновременно с этим сфера очистки сточных вод во всём мире испытывает всё более серьёзную нагрузку вследствие постоянного поступления загрязняющих веществ в поверхностные и подземные воды во многих регионах мира [1]. Рост численности населения, урбанизация, изменение структуры потребления и расширение хозяйственной деятельности привели к значительному увеличению объёмов сточных вод и усилению загрязняющей нагрузки на муниципальные водохозяйственные системы. Недостаточная эффективность очистки сточных вод по-прежнему способствует ухудшению качества водной среды и создаёт серьёзные риски для экосистем и здоровья населения [2].

Канализационные очистные сооружения (КОС) предназначены для очистки сточных вод перед их сбросом в окружающую среду; их основная задача заключается в улучшении качества очищенного стока до уровня, при котором его воздействие на природные системы сводится к минимуму. Однако на практике эта цель достигается не всегда в полной мере, поскольку даже очищенные сточные воды могут содержать сложные смеси загрязняющих веществ, включая взвешенные вещества, биогенные элементы, бактерии и другие микроорганизмы, экологические последствия которых могут существенно различаться [3], [4]. После поступления в принимающие поверхностные водоёмы такие стоки способны изменять химический состав воды, в том числе концентрации отдельных компонентов, минерализацию, значение pH и структуру микробных сообществ, выступая тем самым либо в качестве точечных источников загрязнения, либо как фактор, влияющий на качество воды через процессы разбавления [5], [6]. В связи с этим соблюдение экологических нормативов требует комплексного мониторинга сбросов и детального анализа совокупности показателей качества воды [7].

Для упрощения интерпретации больших массивов данных мониторинга сточных вод и для повышения эффективности управления технологическими процессами в практике оценки качества воды широкое распространение получил индекс качества воды (Water Quality Index, WQI) [8]. Данный индекс позволяет преобразовать результаты наблюдений по химическим, физическим и микробиологическим показателям в единое безразмерное значение, как правило, в диапазоне от 1 до 100, что существенно облегчает оценку соответствия установленным нормативам качества воды [9]. Рассчитанное значение WQI даёт интегральное представление о качестве воды на конкретных КОС в определённый момент времени на основе пороговых значений, закреплённых в стратегических рекомендациях и нормативных документах [10], [11]. В общем случае более высокие значения WQI свидетельствуют о более высокой эффективности очистки, тогда как для исходных сточных вод на входе в сооружения обычно характерны более низкие значения, отражающие неудовлетворительное качество и необходимость последующей обработки перед сбросом. Среди существующих индексов одним из наиболее широко применяемых является индекс качества воды Канадского совета министров по окружающей среде — CCME WQI [12]. Несмотря на то что в настоящее время разработано значительное число моделей WQI, ни одна из них не получила универсального признания вследствие различий в климатических условиях, характере землепользования и нормативно-правовой базе. Вместе с тем CCME WQI отличается простотой расчёта, гибкостью в выборе показателей качества воды и пороговых значений, а также устойчивостью к неполным наборам данных [13]. Эти особенности делают его особенно удобным для адаптации к различным национальным экологическим требованиям и условиям оценки качества воды.

Хотя современные технологии очистки сточных вод способны существенно повысить эффективность удаления загрязняющих веществ, такие улучшения, как правило, сопровождаются ростом энергопотребления и эксплуатационных затрат. Поэтому достижение высокого качества очищенного стока требует сбалансированного подхода, учитывающего не только экологические, но и экономические аспекты устойчивости [14]. В связи с этим в настоящем исследовании выполнена оценка экологиче-

ской эффективности трёх муниципальных канализационных очистных сооружений, расположенных в районе Аль-Баракия, Эн-Наджаф, Ирак: КОС Old Al-Najaf, КОС Bio-Shaft и КОС Compact Unit. В работе рассматривается применимость индекса ССМЕ WQI для оценки качества исходных сточных вод, поступающих на эти сооружения, а также качества очищенного стока, сбрасываемого в реку Евфрат. Анализ основан на данных о качестве сточных вод, полученных в лабораториях трёх станций в ходе полевых выездов, проведённых в период с января по декабрь 2025 года. Индекс ССМЕ WQI был рассчитан по шести ключевым показателям качества воды, что позволило дать комплексную оценку качества входящих сточных вод, эффективности очистки и качества очищенного стока.

Методология исследования

Район исследования

Настоящее исследование посвящено оценке экологической эффективности трёх муниципальных канализационных очистных сооружений, расположенных в районе Аль-Баракия, Эн-Наджаф, Ирак: КОС Old Al-Najaf, КОС Bio-Shaft и КОС Compact Unit. Эти сооружения являются важными элементами городской системы водоотведения Эн-Наджафа и играют существенную роль в очистке хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих из прилегающих городских территорий. Выбор указанных объектов обеспечивает надёжную основу для оценки эффективности очистки, экологической результативности и устойчивости применяемых практик обращения со сточными водами в пределах исследуемой территории.

Район исследования расположен в Аль-Баракии, Эн-Наджаф, Ирак, к юго-востоку от округа Куфа, вдоль русла Евфрата (Шатт-эль-Куфа). На данной территории находятся три станции очистки сточных вод, примерно в 175 км к югу от Багдада.

КОС Old Al-Najaf, показанные на *рисунке 1(a)*, представляют собой традиционную станцию очистки сточных вод, основанную на применении капельных биофильтров. Координаты объекта: E 445513, N 3541801. Согласно опубликованным местным данным, станция обслуживает около 140000 жителей и имеет проектную производительность порядка 35 000 м³/сут. Технологическая схема включает решётки грубой и тонкой очистки, песколовки, первичное отстаивание, биологические капельные фильтры как основной узел вторичной очистки, а затем вторичное отстаивание, хлорирование и обработку осадка. В данной конфигурации удаление органических загрязнений обеспечивается главным образом за счёт развития микробной биоплёнки на поверхности фильтрующей загрузки, тогда как отделившаяся биомасса впоследствии удаляется в отстойниках. Благодаря такой традиционной компоновке станция уже использовалась в предыдущих исследованиях как важный объект для оценки качества очищенных сточных вод, потенциала их повторного использования и экологической эффективности в Эн-Наджафе [15].

КОС Bio-Shaft, показанные на *рисунке 1(b)*, были рассчитаны на обслуживание примерно 200000 жителей при максимальной проектной производительности около 50 000 м³/сут. Координаты объекта: E 445564, N 3541914. Согласно опубликованным исследованиям, проект был реализован в 2011 году на основе системы Bio-shaft Turbo Reactor, а ввод в эксплуатацию состоялся в 2014 году. Станция проектировалась с ориентацией на достижение качества очищенного стока на уровне примерно 10 мг/л по BOD₅, 10 мг/л по TSS и 40 мг/л по COD, что отражает её назначение как объекта углублённой биологической очистки муниципальных сточных вод [16], [17].

С точки зрения технологической схемы станция Bio-Shaft включает сооружения предварительной очистки, такие как решётки грубой и тонкой очистки, после которых предусмотрены узлы удаления песка, масел и жиров. Далее сточные воды поступают на стадию биологической очистки, где аэрация обеспечивает подачу кислорода, необходимого для жизнедеятельности микроорганизмов. Технологическая концепция основана на гибридной системе, сочетающей прикреплённый и взвешенный рост биомассы, при которой внутри реактора на носителях формируется биоплёнка. Это способствует более эффективному удалению органических загрязнений и повышению общей эффективности очистки при сравнительно компактной компоновке сооружения. По принципу работы данная схема близка к технологиям типа IFAS/MBBR, которые объединяют преимущества процесса активного ила и биоплёночной очистки и широко рассматриваются как более устойчивые, менее илообразующие и более интенсивные по сравнению с традиционными системами [18].

КОС Compact Unit, показанные на *рисунке 1(с)*, были введены в эксплуатацию в 2010 году с проектной производительностью 5000 м³/сут для удовлетворения срочной потребности в быстроразворачиваемом объекте очистки сточных вод. Координаты станции: E 445622, N 3542026. Сооружение работает на основе процесса активного ила и включает блоки предварительного процеживания, удаления песка, масел и жиров, аэрации, отстаивания, хлорирования, а также площадки для сушки осадка. Хотя первоначально станция была построена с использованием стальных резервуаров, последующее развитие коррозионных повреждений привело к их замене на железобетонные конструкции. Расположенная в районе Аль-Баракия вблизи станции Bio-Shaft, данная установка представляет собой важную часть местной системы очистки сточных вод; вместе с тем одной из её основных эксплуатационных проблем остаётся избыточное образование осадка, способствующее возникновению неприятных запахов и снижению эффективности очистки.

Три станции очистки сточных вод, расположенные в округе Куфа, играют важную роль в очистке муниципальных сточных вод и в сохранении качества воды реки Евфрат. Несмотря на общую цель, эти сооружения различаются по производительности, технологической конфигурации и техническим характеристикам. Все три станции также сталкиваются с рядом эксплуатационных трудностей, включая необходимость постоянного технического обслуживания, износ оборудования, колебания загрязняющей нагрузки и ограниченность ресурсов, что влияет на эффективность очистки и долговременную надёжность их работы [19]. Эти обстоятельства подчёркивают необходимость постоянной реконструкции, технологической модернизации и внедрения более устойчивых подходов к управлению.

Недавние оценки трёх очистных сооружений в районе Аль-Баракия, Эн-Наджаф, подтверждают важность их непрерывного мониторинга и совершенствования применяемых технологических решений [20]. Несмотря на ключевую роль этих объектов в системе водоотведения и в защите окружающих водных ресурсов, они по-прежнему сталкиваются с устойчивыми проблемами, связанными с состоянием инфраструктуры, особенностями технологии очистки и экологическими последствиями эксплуатации [21].

Решение указанных проблем требует комплексного подхода, основанного на технологическом совершенствовании, рациональном использовании ресурсов и внедрении устойчивых управленческих практик, направленных на повышение эффективности очистки и снижение экологической нагрузки. В этой связи в настоящем исследовании экологическая эффективность указанных сооружений оценивается с использованием индекса качества воды (WQI) с целью выявления их сильных сторон и основных направлений, требующих совершенствования в системе очистки сточных вод.

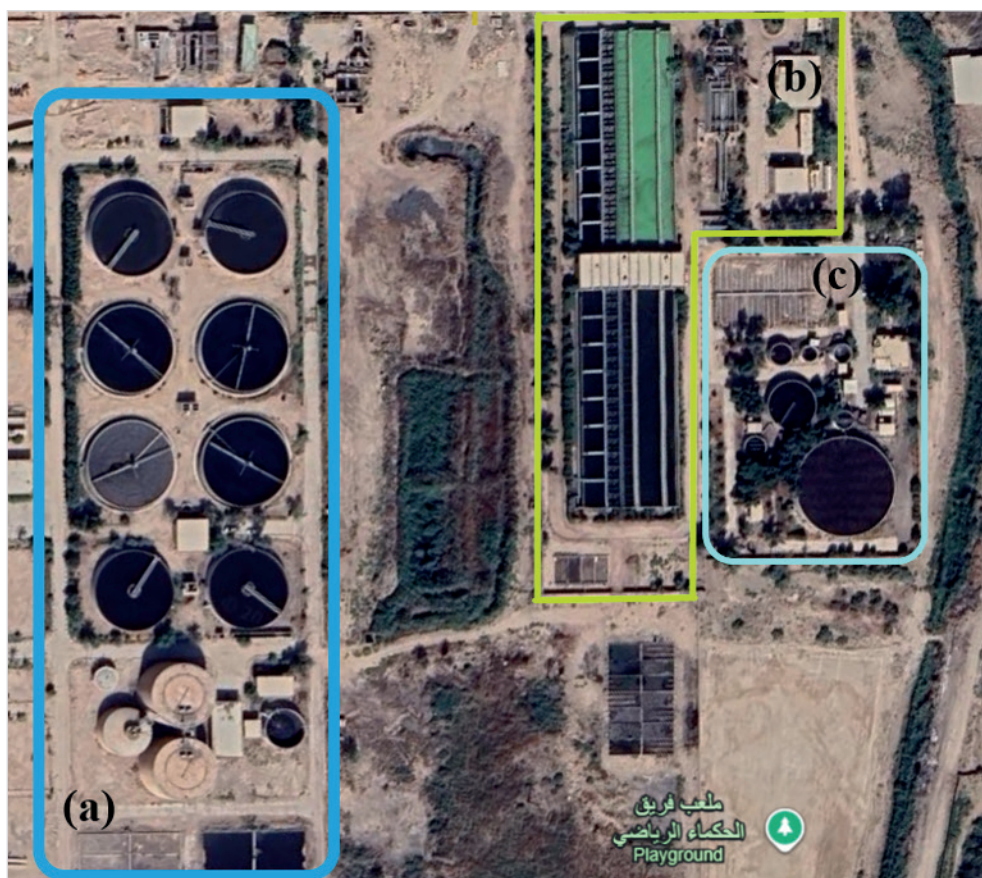


Рис. 1. Схема расположения выбранных канализационных очистных сооружений (КОС): (a) Old Al-Najaf, (b) Bio-Shaft и (c) Compact Unit. Источник: <https://earth.google.com/>

Отбор проб

В настоящем исследовании отбор проб сточных вод проводился на трёх канализационных очистных сооружениях — Old Al-Najaf, Bio-Shaft и Compact Unit — с целью оценки физико-химических характеристик как входящих, так и выходящих потоков. Исследование было направлено на оценку эффективности работы этих сооружений с точки зрения соответствия иракским нормативам качества воды, а также на количественное определение результативности очистки.

Пробы отбирались из входящего потока (неочищенные сточные воды) и выходящего потока (очищенные сточные воды) каждой станции в течение непрерывного периода с января по декабрь 2025 года, что позволило проследить временные и сезонные изменения качества сточных вод на протяжении года.

Все пробы отбирались в чистую стерилизованную тару и доставлялись в лабораторию в строго контролируемых условиях, исключающих загрязнение и физико-химические изменения состава до проведения анализа. Для обеспечения точности и надёжности аналитических результатов строго соблюдались стандартные требования к отбору, консервации, охлаждению и хранению проб.

Выбор показателей качества воды

Показатели BOD_5 , COD, TSS, pH, NH_3 и PO_4^{3-} были выбраны как наиболее информативные для целенаправленной и научно обоснованной оценки качества очищенных муниципальных сточных вод. В совокупности они отражают основные аспекты оценки качества стока, включая биологически раз-

лагаемое органическое загрязнение, химически окисляемую органическую нагрузку, содержание взвешенных веществ, кислотно-щелочное состояние, а также загрязнение, связанное с соединениями азота и фосфора. Таким образом, данный набор показателей обеспечивает сбалансированную основу как для оценки эффективности очистки, так и для характеристики качества очищенных сточных вод, не приводя при этом к неоправданному расширению расчёта CCME-WQI за счёт менее репрезентативных переменных [22]. Отобранные пробы анализировались по указанным физико-химическим показателям в соответствии с иракскими стандартами качества воды (IQS, 2009), а выбранные параметры и соответствующие им предельно допустимые значения приведены в *таблице 1*.

Таблица 1

Иракские нормативные пределы для выбранных показателей качества сточных вод [23]

Показатель	Единицы	Нормативный предел по иракскому стандарту
Биохимическая потребность в кислороде (BOD ₅)	mg/L	40
Химическая потребность в кислороде (COD)	mg/L	100
Общее содержание взвешенных веществ (TSS)	mg/L	60
pH	–	6–9,5
Фосфаты (PO ₄ ³⁻)	mg/L	3
Аммиак (NH ₃)	mg/L	10

Расчёт индекса качества воды

В настоящем исследовании для оценки качества воды использовался индекс качества воды, разработанный Канадским советом министров по окружающей среде (CCME) [24]. Индекс CCME WQI основан на трёх факторах, характеризующих степень антропогенного воздействия на качество воды:

- **F1 (Scope)** — доля показателей качества воды, не соответствующих нормативным значениям «не соответствующие переменные» по отношению к общему числу показателей, включённых в оценку качества воды:

$$F1 = \left(\frac{\text{число показателей, не соответствующих нормативным требованиям}}{\text{общее число оцениваемых показателей}} \right) \times 100;$$

- **F2 (Frequency)** — процент измерений, при которых значение показателя качества воды превышает нормативные значения «несоответствующие результаты» по отношению к общему числу проведённых измерений:

$$F2 = \left(\frac{\text{число результатов, не соответствующих нормативным требованиям}}{\text{общее число измерений}} \right) \times 100;$$

- **F3 (Amplitude)** — величина отклонения значений «несоответствующих результатов» от соответствующих нормативных пределов. Данный показатель рассчитывается с использованием трёхэтапного алгоритма, на первом этапе которого определяется величина отклонения (excursion) так называемых «неудовлетворительных проб» относительно соответствующих предельно допустимых концентраций:

$$excursion_i = \left(\frac{\text{значение несоответствующего результата}_i}{\text{нормативное значение}_j} \right) - 1,$$

где значение несоответствующего результата_i — значение «неудовлетворительной» пробы, а нормативное значение_j — нормативное значение предельно допустимой концентрации для соответствующего показателя качества воды. Далее рассчитывается нормированная сумма отклонений NSE:

$$NSE = \sum_{i=1}^n \frac{excursion_i}{\text{общее число измерений}}.$$

После этого показатель амплитуды F3 определяется по следующей формуле:

$$F3 = \left(\frac{NSE}{0.01NSE + 0.01} \right).$$

Расчёт CCME WQI выполняется путём агрегирования полученных факторов по следующей зависимости:

$$CCME\ WQI = \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right).$$

Приведённое выше уравнение позволяет получить значение CCME-WQI в диапазоне от 0 до 100, где 0 соответствует наихудшему качеству воды, а 100 наилучшему. Полученное значение представляет собой интегральную характеристику общего качества сточных вод и степени их соответствия принятым нормативам. Согласно классификационной системе CCME, качество воды подразделяется на пять категорий: poor (плохое, 0–44), marginal (предельное, 45–64), fair (удовлетворительное, 65–79), good (хорошее, 80–94) и excellent (отличное, 95–100) [24]. В настоящем исследовании данная классификационная шкала использовалась для сопоставления качества входящих и очищенных сточных вод, а также для оценки эффективности работы выбранных канализационных очистных сооружений в течение 12-месячного периода наблюдений.

Результаты и их обсуждение

Общая характеристика показателей качества воды

В *таблицах 2–4* представлена обобщённая характеристика физико-химических показателей воды на трёх канализационных очистных сооружениях: Old Al-Najaf, Bio-Shaft и Compact Unit. Комплексный мониторинг качества входящих и выходящих сточных вод на указанных сооружениях в течение 2025 года показал высокий исходный уровень органической и биогенной нагрузки. Для неочищенных сточных вод были характерны значительные концентрации BOD₅, COD и TSS, существенно превышающие национальные нормативы сброса, что отражает высокую антропогенную нагрузку на систему водоотведения города Эн-Наджаф [25]. Несмотря на то что процессы очистки характеризовались различной степенью эффективности, значения pH оставались относительно стабильными в диапазоне от нейтральной до слабощелочной среды (7,1–8,1), что благоприятно для устойчивого протекания биологических процессов очистки. Вместе с тем очищенные сточные воды станции Old Al-Najaf стабильно характеризовались более высокими остаточными концентрациями аммиака (NH₃) и фосфатов (PO₄³⁻), что указывает на ограниченные возможности старой технологической инфраструктуры в части нитрификации

и удаления биогенных элементов по сравнению с более современными установками Bio-Shaft и Compact Unit [26]. Эти предварительные наблюдения согласуются с результатами современных исследований, выполненных для аридных регионов, где эффективность традиционных систем очистки снижается под влиянием высоких температур, способствующих концентрированию загрязняющих веществ вследствие испарения и увеличения их плотности в сточных водах [27].

Таблица 2

Ежемесячные показатели качества входящих и очищенных сточных вод для КОС Old Al-Najaf в 2025 году

Месяц	Поток сточных вод	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
BOD ₅	Вход	183.4	259.2	218.6	187.1	190	140	135	130	90	290	275.7	261.4
	Выход	22.9	24.7	25	21.9	25	35	30	25	10	25	25	25
COD	Вход	262.3	377.6	336.6	279.6	375	229	243.5	258	110	241	260.1	279.3
	Выход	50	44.1	48.1	48.8	48	76	63	50	21	48.5	48.4	48.4
TSS	Вход	198	168.9	177.7	166.6	176	174	143	112	80	182	181.1	180.3
	Выход	53	45.8	44.6	42	40	37	38.5	40	42	56	53.7	51.4
PH	Вход	7.5	7.8	7.8	7.7	7.8	8	8.2	8.3	8.3	7.7	7.7	7.7
	Выход	7.4	7.4	7.4	7.5	7.3	6.7	7.2	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4
PO ₄ ³⁻	Вход	6.5	9.3	9.7	12.2	11	7	8.2	9.4	10.4	6.4	7.1	7.7
	Выход	3.7	4.2	3.9	3.6	3	6	6.2	6.4	6	6.1	5.7	5.2
NH ₃	Вход	28.8	30.2	36.9	37.2	40	47	38.5	30	36	29	60.6	32.1
	Выход	7.4	7.0	6.6	5.7	5.3	11	11	11	6.6	10	9.3	8.7

Таблица 3

Ежемесячные показатели качества входящих и очищенных сточных вод для КОС Bio-Shaft в 2025 году

Месяц	Поток сточных вод	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
BOD ₅	Вход	183.4	259.2	218.6	187.1	190	140	135	130	90	290	275.7	261.4
	Выход	22.9	24.7	25	21.9	25	35	30	25	10	25	25	25
COD	Вход	262.3	377.6	336.6	279.6	375	229	243.5	258	110	241	260.1	279.3
	Выход	50	44.1	48.1	48.8	48	76	63	50	21	48.5	48.4	48.4
TSS	Вход	198	168.9	177.7	166.6	176	174	143	112	80	182	181.1	180.3
	Выход	53	45.8	44.6	42	40	37	38.5	40	42	56	53.7	51.4
PH	Вход	7.5	7.8	7.8	7.7	7.8	8	8.2	8.3	8.3	7.7	7.7	7.7
	Выход	7.4	7.4	7.4	7.5	7.3	6.7	7.2	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4
PO ₄ ³⁻	Вход	6.5	9.3	9.7	12.2	11	7	8.2	9.4	10.4	6.4	7.1	7.7
	Выход	3.7	4.2	3.9	3.6	3	6	6.2	6.4	6	6.1	5.7	5.2
NH ₃	Вход	28.8	30.2	36.9	37.2	40	47	38.5	30	36	29	60.6	32.1
	Выход	7.4	7.0	6.6	5.7	5.3	11	11	11	6.6	10	9.3	8.7

Таблица 3

Ежемесячные показатели качества входящих и очищенных сточных вод для КОС Bio-Shaft в 2025 году

Месяц	Поток сточных вод	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
BOD ₅	Вход	183.4	259.2	218.6	187.1	190	140	135	130	90	290	275.7	261.4
	Выход	22.9	24.7	25	21.9	25	35	30	25	10	25	25	25
COD	Вход	262.3	377.6	336.6	279.6	375	229	243.5	258	110	241	260.1	279.3
	Выход	50	44.1	48.1	48.8	48	76	63	50	21	48.5	48.4	48.4
TSS	Вход	198	168.9	177.7	166.6	176	174	143	112	80	182	181.1	180.3
	Выход	53	45.8	44.6	42	40	37	38.5	40	42	56	53.7	51.4
PH	Вход	7.5	7.8	7.8	7.7	7.8	8	8.2	8.3	8.3	7.7	7.7	7.7
	Выход	7.4	7.4	7.4	7.5	7.3	6.7	7.2	7.6	7.6	7.5	7.5	7.4
PO ₄ ³⁻	Вход	6.5	9.3	9.7	12.2	11	7	8.2	9.4	10.4	6.4	7.1	7.7
	Выход	3.7	4.2	3.9	3.6	3	6	6.2	6.4	6	6.1	5.7	5.2
NH ₃	Вход	28.8	30.2	36.9	37.2	40	47	38.5	30	36	29	60.6	32.1
	Выход	7.4	7.0	6.6	5.7	5.3	11	11	11	6.6	10	9.3	8.7

Таблица 4

Ежемесячные показатели качества входящих и очищенных сточных вод для КОС Compact Unit в 2025 году

Месяц	Поток сточных вод	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
BOD ₅	Вход	20	320	276.7	206.5	190	170	170	170	100	180	126.7	73.3
	Выход	15	5	16.3	22.5	39	20	17.5	15	20	5	8.3	11.7
COD	Вход	301	795	577	297.5	141	273	362	451	130	484	423	362
	Выход	61	12.8	30.5	49.7	66	69	59.5	50	75	23.2	35.8	48.4
TSS	Вход	235	143	130.3	122.4	105	97	95	93	90	184	201	218
	Выход	58	36.0	39	40.7	45	38	33.5	29	23	46	50	54
PH	Вход	6.8	7.6	7.6	7.4	7.5	8	7.8	7.5	7.9	7.6	7.3	7.1
	Выход	8	8	8	8	7.9	7	7.2	7.3	7.5	7.1	7.4	7.7
PO ₄ ³⁻	Вход	3.4	16.4	15.8	18.5	14.7	10.8	11	11.2	10.3	30	21.1	12.3
	Выход	1.1	6.4	7.4	7.9	9.5	8.7	9.8	10.8	9.9	18	12.4	6.7
NH ₃	Вход	16	17	28.4	36.5	51.1	55.5	39.2	23	11	41	32.7	24.3
	Выход	8.9	9.2	21.1	25.1	44.9	9	8.4	7.9	1	1.7	4.1	6.5

Оценка качества входящих и очищенных сточных вод с использованием индекса CCME-WQI

Как показано в **таблице 5** и на **рисунке 2**, результаты расчёта CCME-WQI свидетельствуют о явном улучшении качества сточных вод после очистки. Все пробы входящих сточных вод были отнесены к категории плохого качества, тогда как очищенные сточные воды станции Old Al-Najaf сохранили эту же категорию (44,17), а на станциях Bio-Shaft (76,93) и Compact Unit (71,76) качество повысилось до кате-

гории удовлетворительное. Полученные результаты показывают, что среди исследованных сооружений станция Bio-Shaft обеспечила наилучшее общее качество очищенных сточных вод.

Таблица 5

Категоризация качества входящих и очищенных сточных вод по индексу WQI на трёх станциях

Станции	KOC Old Al-Najaf	KOC Bio-Shaft	KOC Compact Unit
Входящие сточные воды			
Значение WQI	20.310	21.848	21.603
Категория качества	Poor	Poor	Poor
F1	83.333	83.333	83.333
F2	83.333	83.333	81.944
F3	71.842	66.582	69.122
Очищенные сточные воды			
Значение WQI	44.169	76.934	71.758
Категория качества	Poor	Fair	Fair
F1	83.333	33.333	33.333
F2	37.500	19.444	19.444
F3	31.623	10.336	30.059

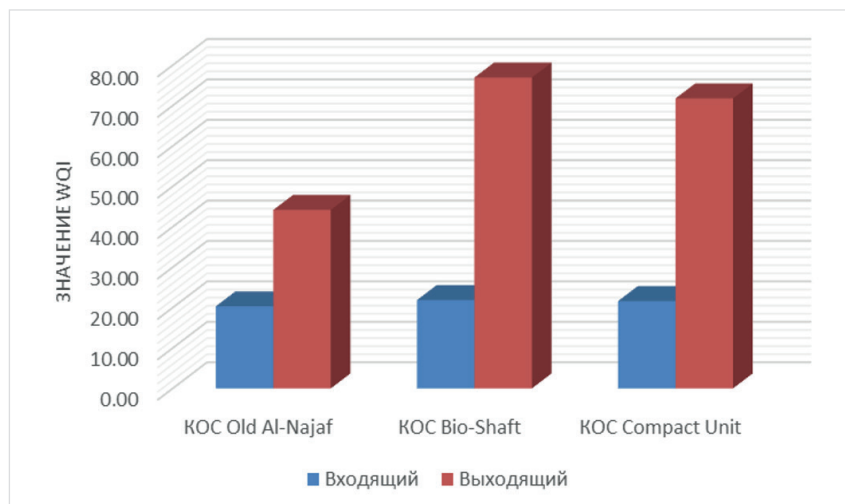


Рис. 2. Сравнение значений SSME-WQI для входящих и очищенных сточных вод на исследуемых КОС

Интерпретация результатов оценки качества входящих сточных вод

Критически низкие значения WQI для входящих сточных вод (20,3–21,8) указывают на плохое экологическое состояние, что в первую очередь обусловлено высокими концентрациями органических загрязнений (BOD_5 и COD) и взвешенных веществ (TSS). Такие уровни загрязнения связаны с высокой плотностью городской деятельности в Эн-Наджафе и отсутствием локальной предварительной

очистки для части бытовых сбросов [28]. Высокие значения факторов F1 (83,33) и F2 (83,33) подтверждают, что в течение 2025 года концентрации загрязняющих веществ систематически превышали иракские нормативные пределы. Подобное устойчивое несоответствие для неочищенных сточных вод типично для аридных регионов, где относительно низкое водопотребление на душу населения приводит к формированию более концентрированных сточных вод, что, в свою очередь, осложняет последующие стадии биологической очистки [25].

Анализ качества очищенных сточных вод

Результаты оценки очищенных сточных вод выявили отчётливые различия в эффективности работы трёх исследованных сооружений. КОС Bio-Shaft обеспечили наилучшее общее качество очищенного стока, за ними следовали КОС Compact Unit, тогда как КОС Old Al-Najaf продемонстрировали наименее эффективные результаты. Такая интерпретация согласуется с результатами расчёта ССМЕ-WQI, согласно которым Bio-Shaft и Compact Unit достигли категории удовлетворительного качества, тогда как Old Al-Najaf остались в категории плохого качества. Более низкое качество очищенных сточных вод на станции Old Al-Najaf свидетельствует о том, что очистка действительно снизила концентрации загрязняющих веществ, однако этого оказалось недостаточно для предотвращения повторяющихся превышений принятых нормативов [29], [30].

Наблюдаемая картина показывает, что исследованные КОС в целом более эффективно удаляли традиционные загрязнители, чем обеспечивали полный контроль над показателями, связанными с биогенными веществами. Современные исследования, выполненные на действующих очистных сооружениях, также показывают, что BOD₅, COD и TSS обычно удаляются эффективнее, чем соединения аммиака и фосфора, а итоговая классификация качества очищенного стока в значительной степени определяется величиной остаточных превышений по биогенным компонентам [30]. Исходя из этого, можно заключить, что основное ограничение исследованных систем связано не столько с удалением биологически разлагаемой органики как таковой, сколько с недостаточной стабилизацией качества очищенного стока, особенно в части контроля соединений азота и фосфора.

Описательный анализ показателей качества очищенных сточных вод

Как показано в **таблице 6**, очищенные сточные воды трёх исследованных КОС в целом характеризовались удовлетворительной степенью удаления традиционных загрязняющих компонентов. Средние значения BOD₅, COD и TSS на всех станциях оставались ниже принятых иракских нормативных пределов, а значения pH находились в допустимом диапазоне. Наиболее сбалансированными показателями качества очищенного стока отличались КОС Bio-Shaft, где были зафиксированы сравнительно низкие средние значения COD (49,5 мг/л) и NH₃ (8,3 мг/л), тогда как на КОС Compact Unit наблюдались минимальные средние концентрации BOD₅ (16,3 мг/л) и TSS (41,0 мг/л). Такая картина свидетельствует о том, что все три станции в целом эффективно снижали содержание органических веществ и взвешенных частиц, что соответствует выводам современных исследований, выполненных на действующих очистных сооружениях, где для BOD₅, COD и TSS обычно отмечается более высокая эффективность удаления по сравнению с показателями, связанными с биогенными веществами.

В то же время контроль биогенных компонентов оставался основным ограничивающим фактором качества очищенного стока. Средние концентрации PO₄³⁻ превышали иракский норматив (3 мг/л) на всех станциях, достигая 9,4 мг/л на Old Al-Najaf, 5,0 мг/л на Bio-Shaft и 9,1 мг/л на Compact Unit. Средние значения NH₃ также оставались выше допустимого предела (10 мг/л) на станциях Old Al-Najaf (15,9 мг/л) и Compact Unit (12,3 мг/л), тогда как Bio-Shaft была единственной станцией, на которой среднее значение этого показателя оказалось ниже нормативного уровня. Эти результаты позволяют

сделать вывод о том, что основное различие между исследованными сооружениями определялось не столько эффективностью удаления традиционных загрязнителей, сколько степенью остаточного превышения по биогенным компонентам в очищенном стоке; подобная закономерность широко отмечается и в современных исследованиях, посвящённых эффективности муниципальных очистных сооружений и модернизации систем доочистки.

Таблица 6

Описательная статистика выбранных показателей качества очищенных сточных вод

Показатель	Единицы	Нормативный предел по иракскому стандарту	KOC Old Al-Najaf				KOC Bio-Shaft				KOC Compact Unit			
			Среднее значение	Стандартное отклонение	Мин	Макс	Среднее значение	Стандартное отклонение	Мин	Макс	Среднее значение	Стандартное отклонение	Мин	Макс
BOD ₅	mg/L	40	32.9	10.4	20	55	24.5	5.7	10	35	16.3	9.2	5	39
COD	mg/L	100	88.4	10.9	59	101	49.5	12.6	21	76	48.4	19.3	12.8	75
TSS	mg/L	60	50	10	30	67	45.3	6.6	37	56	41	10.2	23	58
pH	–	6–9.5	7.8	0.3	7.4	8.5	7.4	0.2	6.7	7.6	7.6	0.4	7	8
NH ₃	mg/L	10	15.9	8.1	10.1	31.3	8.3	2.1	5.3	11	12.3	12.5	1	44.9
PO ₄ ³⁻	mg/L	3	9.4	3.6	2.6	17	5	1.2	3	6.4	9.1	4	1.1	18

Заключение

Применение индекса качества воды по методике CCME (CCME-WQI) позволило сформировать практичную и надёжную основу для оценки качества как входящих, так и очищенных сточных вод на трёх исследованных канализационных очистных сооружениях, а также для сопоставления их относительной эффективности в рамках принятых иракских нормативов. Полученные результаты показали, что сточные воды на входе KOC Old Al-Najaf, KOC Bio-Shaft и KOC Compact Unit на протяжении всего периода наблюдений стабильно относились к категории плохого качества, что свидетельствует о высокой загрязняющей нагрузке поступающих муниципальных сточных вод. Несмотря на то, что очистка способствовала улучшению качества воды на всех трёх сооружениях, степень этого улучшения заметно различалась. Наилучшее общее качество очищенного стока было достигнуто на KOC Bio-Shaft, за которыми следовали KOC Compact Unit, тогда как KOC Old Al-Najaf продемонстрировали наименее эффективные результаты и сохранили категорию плохого качества.

Результаты описательного статистического анализа очищенных сточных вод также показали, что все три станции в целом эффективно снижали содержание традиционных загрязняющих компонентов, прежде всего BOD₅, COD и TSS, при этом значения pH оставались в допустимом диапазоне. Вместе с тем показатели, связанные с биогенными веществами, в частности NH₃ и PO₄³⁻, продолжали выступать основными факторами, ограничивающими качество конечного очищенного стока. В этом отношении KOC Bio-Shaft продемонстрировали наиболее сбалансированные характеристики очищенной воды, отличаясь более низкими остаточными концентрациями и лучшей общей степенью соответствия

нормативам, тогда как КОС Old Al-Najaf нуждаются в более существенном повышении эксплуатационной эффективности, особенно в части контроля биогенных компонентов и снижения повторяющихся превышений по отдельным показателям. В целом полученные результаты подтверждают, что ССМЕ-WQI может быть эффективно адаптирован к иракским нормативным условиям и использоваться в качестве полезного инструмента поддержки принятия решений при мониторинге работы очистных сооружений, а также при определении основных направлений, требующих технической модернизации и оптимизации технологических процессов.

Библиографический список

1. M. A. Onu, O. O. Ayeleru, B. Oboirien, and P. A. Olubambi, “Challenges of wastewater generation and management in sub-Saharan Africa: A review”, *Environmental Challenges*, vol. 11, Art. no. 100686, 2023, doi: 10.1016/j.envc.2023.100686.
2. F. J. Burdon, N. A. Munz, M. Reyes, A. Focks, A. Joss, K. Räsänen, F. Altermatt, R. I. L. Eggen, and C. Stamm, “Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams”, *Science of the Total Environment*, vol. 659, pp. 1256–1265, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.372.
3. A. Nadella and D. Sen, “Application of wastewater quality index (WWQI) as an evaluation tool: A case of stormwater flow channel (SWF) of Kolkata, India”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 194, no. 2, Art. no. 80, 2022, doi: 10.1007/s10661-021-09714-7.
4. I. de Guzman, A. Elozegi, D. von Schiller, J. González, E. Paz, B. Gauzens, U. Brose, A. Antón, N. Olarte, J. Montoya, and A. Larrañaga, “Treated and highly diluted, but wastewater still impacts diversity and energy fluxes of freshwater food webs”, *Journal of Environmental Management*, vol. 345, Art. no. 118510, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118510.
5. L. Zhu, J. Liu, Y. Xin, W. Yu, D. Yu, Y. Wang, Y. Xu, and Y. Wei, *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*, vol. 43, p. 89, 2023.
6. Q. Lu, R. Zhao, Q. Li, Y. Ma, J. Chen, Q. Yu, D. Zhao, and S. An, “Elemental composition and microbial community differences between wastewater treatment plant effluent and local natural surface water: A Zhengzhou city study”, *Journal of Environmental Management*, vol. 325, pt. A, Art. no. 116398, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116398.
7. A. El Aatik, J. M. Navarro, R. Martínez, and N. Vela, “Estimation of global water quality in four municipal wastewater treatment plants over time based on statistical methods”, *Water*, vol. 15, no. 8, Art. no. 1520, 2023, doi: 10.3390/w15081520.
8. S. Raut, G. Anaokar, and A. Dharnaik, *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, vol. 4, p. 733, 2017.
9. N. Bharti and D. Katyral, *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 2, p. 154, 2011.
10. S. Tyagi, B. Sharma, P. Singh, and R. Dobhal, *American Journal of Water Resources*, vol. 1, p. 34, 2013.
11. T. Poonam, B. Tanushree, and C. Sukalyan, *International Journal of Advanced Chemistry*, vol. 1, p. 15, 2015.
12. S. Das and R. Sarkar, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 15853–15864, 2021.
13. T. Abbasi and S. A. Abbasi, *Water Quality Indices*. London, U.K.: Elsevier, 2012.

14. *Y. Fadhl*, “Energy consumption and cost implications of advanced water treatment technologies”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2001 – 2015, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.01.017.

15. *S. I. Khassaf* and *F. M. Kizar*, “Reuse of treated sanitary sewage in Najaf City for agricultural purposes”, *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 558 – 578, 2011.

16. *R. H. Naji*, *B. H. Khudair Al-Obaidi*, and *M. S. Salman*, “Evaluating the efficiency of some wastewater treatment plants in Najaf Governorate”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1145, Art. no. 012053, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1145/1/012053.

17. *H. M. Al-Hameedi* and *H. Al-Madany*, “Evaluation of efficiency of IFAS wastewater treatment plant in Barrakiha, Kufa, Iraq”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 3249, Art. no. 030012, 2024, doi: 10.1063/5.0237203.

18. *R. H. Hasannajy*, *B. K. Al-Obaidi*, and *M. S. Salman*, “A comparative study of a moving bed biofilm reactor and Bio-shaft technology for a wastewater treatment process: A review”, *Journal of Engineering*, vol. 27, no. 6, pp. 47 – 58, 2021, doi: 10.31026/j.eng.2021.06.04.

19. *H. Jasim*, *S. Al-Badrani*, and *M. Qasim*, “Advancements and challenges in treatment technologies at the Al-Barakiya facility”, *Water Research*, vol. 215, Art. no. 118348, 2023.

20. *A. H. Al-wardy*, *Evaluation and Modelling of the Performance of Wastewater Treatment Plant in Al-Muamirah in the Province of Babylon for the Removal Pollutant of Municipal Wastewater*, doctoral dissertation, Univ. of Kerbala, Kerbala, Iraq, 2021.

21. *A. Muhammad*, *Z. Kareem*, and *T. Abbas*, “Performance evaluation of the Al-Barakiya wastewater treatment facility: Challenges in operational efficiency”, *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 14, no. 7, pp. 1587 – 1594, 2015.

22. U. S. Environmental Protection Agency, “Secondary Treatment Standards”; U.S. Environmental Protection Agency, “Aquatic Life Criteria for Ammonia”; U. S. Environmental Protection Agency, “Nutrient Pollution”; European Union, “Urban Waste Water Treatment Directive”.

23. Iraqi Standards for Water Quality (IQS), Physical and Chemical Characteristics of Water, Standard 417. Baghdad, Iraq: Central Organization for Standardization and Quality Control, 2009.

24. Canadian Council of Ministers of the Environment, *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0*, Technical Report. Winnipeg, MB, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001.

25. *M. A. Al-Jubouri* and *S. K. Al-Obaidy*, “Technological performance and environmental impact of municipal wastewater treatment in rapidly urbanizing arid regions”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 395, Art. no. 137810, 2023.

26. *R. K. Shrestha* and *M. Tanaka*, “Evaluation of advanced biological treatment systems for nutrient removal in municipal wastewater: A global perspective”, *Water Research*, vol. 251, Art. no. 121350, 2024.

27. *H. J. Lee* and *T. M. Wang*, “Impact of climate conditions on the chemical characteristics of municipal influent in semi-arid zones”, *Environmental Research*, vol. 228, Art. no. 116542, 2023.

28. *S. Ahmed* and *T. R. Manning*, “Spatio-temporal analysis of sewage influent quality in rapidly expanding urban centers”, *Journal of Environmental Management*, vol. 318, Art. no. 115432, 2022.

29. *O. Inbar* and *D. Avisar*, “Enhancing wastewater treatment through artificial intelligence: A comprehensive study on nutrient removal and effluent quality prediction”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 61, Art. no. 105212, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105212.

30. R. Jerves-Cobo, E. Maldonado, J. F. Hidalgo-Cordero, H. García-Herazo, and D. Mora-Serrano, "Comparative assessment of wastewater treatment technologies for pollutant removal in high-altitude Andean sites", *Water*, vol. 17, no. 12, Art. no. 1800, 2025, doi: 10.3390/w17121800.

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT OF THREE MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS IN AL-NAJAF, IRAQ USING THE CCME WATER QUALITY INDEX (CCME-WQI)

H. M. J. Alshukri * / **

N. S. Tsarev *

* Ural Federal University, Yekaterinburg

** University of Kufa, An-Najaf

Abstract

This study evaluated the environmental performance of three municipal wastewater treatment plants in Al-Barakia, Al-Najaf, Iraq, namely WWTP Old Al-Najaf, WWTP Bio-Shaft, and WWTP Compact Unit, using the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI). Wastewater samples were collected monthly from influent and effluent streams from January to December 2025. The assessment was based on six selected physicochemical parameters, namely BOD₅, COD, TSS, pH, NH₃ and PO₄³⁻, in accordance with the Iraqi Standards for Water Quality (IQS, 2009). The results showed that the influent wastewater at all three plants was classified as poor, with CCME-WQI values of 20.31, 21.85, and 21.60 for WWTP Old Al-Najaf, WWTP Bio-Shaft, and WWTP Compact Unit, respectively. After treatment, water quality improved at all plants; however, the degree of improvement varied. The treated effluent of Old Al-Najaf remained poor (44.17), whereas Bio-Shaft (76.93) and Compact Unit (71.76) improved to the fair category. Descriptive statistics of the treated effluents showed that mean BOD₅, COD, TSS, and pH generally complied with Iraqi limits, while NH₃ and PO₄³⁻ remained the principal limiting parameters, particularly in Old Al-Najaf and Compact Unit. Overall, the study confirms that CCME-WQI is an effective tool for evaluating treatment performance and differentiating the operational status of municipal wastewater treatment plants under Iraqi conditions.

The Keywords

CCME-WQI, municipal wastewater, wastewater treatment plants, effluent quality, Euphrates River, Iraq, Al-Najaf.

Date of receipt in edition

19.03.2026

Date of acceptance for printing

26.03.2026

Ссылка для цитирования:

Х. М. Д. Алишукри, Н. С. Царев. Оценка экологической эффективности трёх муниципальных станций очистки сточных вод в Эн-Наджафе (Ирак) с использованием индекса качества воды CCME-WQI. — Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 82–96.