Оригинальная статья

УДК 504.45
DOI: 10.17277/voprosy.2026.03.pp.065-077

ПРОБНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЭВТРОФИКАЦИИ МАЛЫХ РЕК УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ (на примере г. Ярославля)

© Э. М. Сафиуллин[1]✉, О. В. Ладыгина[1], Т. Р. Насибов[1]

[1] *ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Московский просп., 88, Ярославль, 150023, Российская Федерация*
✉ safiullinedik@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты апробации комплексной методики оценки риска эвтрофикации малых рек – притоков Волги в городской черте Ярославля. Актуальность исследования обусловлена возрастающей антропогенной нагрузкой на поверхностные водные объекты, связанной с урбанизацией и распределенным поступлением биогенных элементов. Предложен и верифицирован оригинальный интегральный индекс экологического риска, который объединяет три компонента: гидрохимические показатели, трофический статус по фосфору и спутниковый индекс хлорофилла, рассчитываемый по данным спутника Sentinel-2. Эмпирическая база исследования включает данные полевых проб, отобранных в трех сезонах 2025 года на шести водотоках. Продемонстрирована высокая информативность спутникового зондирования.

Ключевые слова: биогенные элементы; городская инфраструктура; интегральный риск; малые реки; показатель NDCI; спутник Sentinel-2; эвтрофикация.

Для цитирования. Сафиуллин Э. М., Ладыгина О. В., Насибов Т. Р. Пилотная оценка экологического риска эвтрофикации малых рек урбанизированной территории (на примере г. Ярославля) // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2026. – № 3(101). – С. 065–077. doi: 10.17277/voprosy.2026.03.pp.065-077

Trial Assessment of Ecological Risk of Eutrophication of Small Rivers in Urbanized Area (Case Study of Yaroslavl)

© Eduard M. Safiullin[1]✉, Olga V. Ladygina[1], Tabriz R. Nasibov[1]

[1] *Yaroslavl State Technical University, 88, Moskovsky Pr., Yaroslavl, 150023, Russian Federation*
✉ safiullinedik@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of pilot testing of a comprehensive methodology for assessing eutrophication risk in small tributaries of the Volga within Yaroslavl. The relevance is due to increasing anthropogenic pressure from urbanization and diffuse nutrient inputs. The authors propose and verify an original integral risk index combining three components: hydrochemical parameters (hazard quotient for nitrogen and phosphorus compounds), trophic status by phosphorus, and the satellite derived Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) from Sentinel 2.

The empirical base includes field samples from three seasons of 2025 at six water courses. The study demonstrates the high informativeness of remote sensing: NDCI reliably detects phytoplankton blooms even when hydrochemical standards are met, as shown for the Kotorosl River.

Keywords: nutrients; urban infrastructure; integral risk; small rivers; NDCI; Sentinel-2; eutrophication.

For citation. Safiullin E. M., Ladygina O. V., Nasibov T. R. Trial Assessment of Ecological Risk of Eutrophication of Small Rivers in Urbanized Area (Case Study of Yaroslavl), *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2026, no. 3(101), pp. 065-077. doi: 10.17277/voprosy.2026.03.pp. 065-077

Введение

Уровень урбанизации населения Ярославской области в городской черте, согласно официальной статистике, сопровождается устойчивым ростом доли горожан, что напрямую увеличивает нагрузку на поверхностные водные объекты [1]. Среди сопутствующих экологических последствий наиболее значимо насыщение водоемов биогенными соединениями азота и фосфора. Данный процесс, обозначаемый как эвтрофикация, ведет к смене трофического статуса и, как следствие, деградации водных экосистем: избыточное поступление лимитирующих элементов стимулирует гиперпродукцию фитопланктона. Примечательно, что именно хозяйственная деятельность человека выступает здесь пусковым механизмом.

Особую уязвимость обнаруживают малые реки, чьи бассейны находятся в границах городских агломераций и на прилегающих территориях. В силу низкой водности и слабого ассимиляционного потенциала такие водотоки служат оперативными реципиентами внешнего воздействия, что подтверждается, в частности, наблюдениями [2]. Переход от фонового состояния к нарушенному фиксируется здесь на порядок быстрее, чем в крупных речных артериях.

Происхождение биогенной нагрузки определяется сочетанием точечных и распределенных источников, причем доминирующую роль приобретает рассеянное поступление примесей – неочищенные коммунально-бытовые стоки, плоскостной смыв с застроенных территорий, дачных массивов и сельскохозяйственных угодий. Согласно оценкам [3], вклад неконтролируемого загрязнения такого типа может достигать более половины суммарного выноса соединений азота и фосфора в водные объекты. Организованные сбросы уступают по значимости рассредоточенным источникам.

Существующая система традиционного мониторинга, основанная на дискретных гидрохимических пробах, имеет известные ограничения по временному охвату, однако именно она является законодательно принятой и обязательной для оценки состояния водных объектов. В качестве дополнения к ней предлагается использовать технологии дистанционного зондирования Земли, позволяющие проводить регулярную количественную оценку хлорофилла-*a* – прямого маркера интенсивности «цветения» воды [4].

Применительно к Ярославлю, расположенному в пределах Волжского бассейна, проблема биогенного загрязнения малых притоков остается практически неизученной. В городской черте Волга принимает сток Которосли, Норы, Толгоболки, Дунайки, Урочи и Шевелюхи. Под воздействием локальных факторов – индивидуальной жилой застройки, садоводческих товариществ, промышленных площадок – у каждого из этих водотоков формируется собственный гидрохимический режим. Однако до настоящего времени не предпринималось попыток комплексной оценки риска эвтрофикации данных объектов с привлечением спутниковой информации. Восполнение этого пробела требует синтеза наземных и дистанционных методов наблюдения.

Цель работы – апробация методических подходов к системе оценки и управления рисками загрязнения поверхностных вод биогенными элементами на основе сочетания гидрохимического анализа, ГИС-картографирования и спутниковых индексов (на примере малых притоков Волги в городской черте Ярославля).

Задачи:

1) оценить сезонную динамику концентраций соединений азота и фосфора в приустьевых участках шести малых рек;

2) рассчитать спутниковый индекс хлорофилла NDCI (*англ.* Normalized Difference Chlorophyll Index) для соответствующих точек и сезонов года;

3) разработать и апробировать интегральный индекс экологического риска, объединяющий химическую, трофическую и спектральную компоненты;

4) выявить наиболее проблемные водотоки с точки зрения приоритетности водоохранных мероприятий;

5) подтвердить результаты дистанционного зондирования сопоставлением с натурными гидрохимическими данными.

Новизна работы заключается в первой для Ярославского региона попытке применения трехкомпонентной риск-ориентированной методики оценки для малых рек-притоков Волги с использованием открытых спутниковых данных.

Материалы и методы

Район исследований. Работа выполнена в границах Ярославля и его пригородов. *Объекты* – реки Которосль, Нора, Толгоболка, Дунайка, Урочь, Шевелюха – малые притоки Волги. Все водотоки в нижнем течении проходят через зоны садоводческих некоммерческих товариществ и частной жилой застройки. Отбор проб проводили в приустьевых участках (200…500 м от устья) в трех гидрологических сезонах 2025 г.: весна (апрель–май), лето (июль–август), осень (сентябрь – ноябрь). Выбор приустьевой зоны обусловлен необходимостью оценки реального стока биогенов в главную реку.

Отбор и анализ проб. Пробы воды отбирали в трехкратной повторности в каждой точке (три индивидуальные пробы за сезон) с поверхности (глубина 0,2…0,5 м). Транспортировку и хранение осуществляли в пластиковых бутылях при 4 °С. Определение концентраций проводили фотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5400УФ согласно аттестованным методикам:

– фосфат-ион (PO_4^{3-} в пересчете на фосфор) – ПНД Ф 14.1:2:4.112-97;

– нитрат-ион (NO_3^-) – ПНД Ф 14.1:2:4.4-95;

– нитрит-ион (NO_2^-) – ПНД Ф 14.1:2:3:4.3-2023;

– аммоний-ион (NH_4^+) – ПНД Ф 14.1:2:3.1-95.

Спутниковая обработка осуществлялась с использованием аэрокосмических снимков спутника Sentinel-2 (уровень L2A, облачность менее 10 %, атмосферная коррекция Sen2Cor) за даты, максимально близкие к отбору проб (разница не более трех дней). Для каждой точки рассчитывали NDCI по стандартной методике [4].

В настоящей работе предложен новый интегральный индекс экологического риска (**ИИР**), представленный тремя составляющими:

1. *Индекс биогенной нагрузки* (**ИБН**) – максимальный коэффициент опасности ИБН = C_i/ПДК$_{рх}$ (приказ Минсельхоза № 296) для четырех веществ: NH_4^+ (ПДК = 0,5 мг/дм^3), NO_2^- (0,08 мг/дм^3), NO_3^- (40 мг/дм^3), PO_4^{3-} по Р (0,15 мг/дм^3 для мезотрофных водоемов, взято как средний норматив). Баллы: 0 – ИБН ≤ 1; 1 – 1 < ИБН ≤ 5; 2 – ИБН > 5.

2. *Индекс фосфорного лимитирования* (**ИФЛ**) – по концентрации фосфора (PO_4^{3-} в пересчете на Р): 0 баллов – < 0,05 мгР/дм^3 (олиготрофный), 1 балл – 0,05…0,20 мгР/дм^3 (мезотрофный), 2 балла – > 0,20 мгР/дм^3 (эвтрофный).

3. *Индекс хлорофилла-а* NDCI – на его основе с порогами, рекомендованными в [7]: 0 баллов – NDCI < 0,10 (низкая концентрация хлорофилла); 1 балл – 0,10 ≤ NDCI ≤ ≤ 0,30; 2 балла – NDCI > 0,30.

Итоговый балл для каждого водотока рассчитывается как сумма показателей: ИИР = ИБН + ИФЛ + NDCI (максимум 6). Аддитивность индекса обоснована тем, что три компонента отражают независимые (хотя и взаимосвязанные) аспекты эвтрофикации: непосредственное химическое загрязнение (ИБН), потенциальную биодоступность лимитирующего элемента (ИФЛ) и фактический отклик экосистемы в виде развития фитопланктона (NDCI). Суммирование баллов позволяет получить обобщенную оценку, удобную для ранжирования объектов при ограниченном объеме данных. Уровень риска: 0–1 – низкий, 2–3 – средний, 4 – 6 – высокий.

Для каждого параметра вычисляли среднее арифметическое и стандартное отклонение. Ввиду малого объема выборки (n = 3 для каждого сезона) и отсутствия уверенности в нормальности распределения данных, для оценки связей между показателями использовали непараметрический коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ. Такой подход, рекомендованный для малых выборок, позволил получить предварительные оценки связей даже на ограниченном пилотном материале.

Результаты исследований

В таблице 1 приведены средние концентрации биогенных элементов для каждого сезона и реки. Все показатели соответствуют нормативам СанПиН для хозяйственно-питьевого водопользования, однако по рыбохозяйственным ПДК выявлены превышения.

Наиболее высокие концентрации нитритов зафиксированы в Толгоболке (1,07 мг/дм^3 весной, превышение в 13 раз) и Норе (2,32 мг/дм^3 весной,

Таблица 1

Концентрации биогенных элементов в приустьевых участках, мг/дм^3

Река	Сезон	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-} (по P)
Толгоболка	Весна	0,03 ± 0,005	1,07 ± 0,09	12,95 ± 1,20	0,21 ± 0,02
	Лето	0,17 ± 0,015	0,76 ± 0,06	1,23 ± 0,10	0,16 ± 0,015
	Осень	0,20 ± 0,02	0,65 ± 0,05	0,00 ± 0,00	0,10 ± 0,01
Нора	Весна	0,20 ± 0,02	2,32 ± 0,15	32,07 ± 2,50	0,04 ± 0,005
	Лето	0,02 ± 0,005	0,03 ± 0,005	10,65 ± 0,90	0,27 ± 0,02
	Осень	0,20 ± 0,03	0,04 ± 0,005	12,05 ± 1,00	0,28 ± 0,02
Дунайка	Весна	0,03 ± 0,005	0,10 ± 0,01	1,22 ± 0,10	0,03 ± 0,005
	Лето	0,01 ± 0,004	0,12 ± 0,01	2,49 ± 0,21	0,04 ± 0,005
	Осень	0,04 ± 0,005	0,10 ± 0,01	0,90 ± 0,08	0,03 ± 0,006
Которосль	Весна	0,12 ± 0,01	0,04 ± 0,006	2,17 ± 0,22	0,30 ± 0,005
	Лето	0,10 ± 0,01	0,02 ± 0,005	2,00 ± 0,18	0,03 ± 0,005
	Осень	0,00 ± 0,00	0,03 ± 0,003	6,85 ± 0,60	0,04 ± 0,003
Урочь	Весна	0,01 ± 0,004	0,04 ± 0,005	1,69 ± 0,15	0,02 ± 0,005
	Лето	0,26 ± 0,02	0,04 ± 0,005	0,00 ± 0,00	0,09 ± 0,01
	Осень	0,20 ± 0,02	0,05 ± 0,005	0,00 ± 0,00	0,06 ± 0,005
Шевелюха	Весна	0,12 ± 0,01	0,03 ± 0,006	1,00 ± 0,08	0,05 ± 0,005
	Лето	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,005	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,005
	Осень	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,005	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00

Данные представлены как среднее арифметическое ± стандартное отклонение для трех проб в каждом сезоне.

превышение в 29 раз). В Норе летом и осенью нитриты отсутствуют, но отмечается высокий уровень фосфора (0,27…0,28 мг/дм^3), соответствующий эвтрофному статусу.

Дунайка демонстрирует хроническое, но умеренное нитритное загрязнение (0,10…0,12 мг/дм^3). Которосль, Урочь и Шевелюха по гидрохимическим показателям соответствуют олиготрофному статусу.

Значения индекса NDCI для каждого сезона представлены в табл. 2. Самые низкие показатели отмечены весной в Норе (0,189) и Толгоболке (0,210). Наиболее высокие – в Которосли во все сезоны (0,456…0,474), а также в Урочи и Шевелюхе летом (0,540 и 0,440 соответственно). В Дунайке NDCI стабильно находится в диапазоне 0,257…0,267.

Результаты расчета ИИР приведены в табл. 3. Наивысший риск (5 баллов, весна) присвоен реке Толгоболка за счет сочетания высокого индекса биогенной нагрузки (ИБН > 5 по нитритам) и эвтрофного статуса по фосфору. Летом и осенью риск снижается до 4 баллов (мезотрофный). Для Норы риск оценен как средний (3 балла) во все сезоны: весной – из-за

Таблица 2

Значения NDCI (по пикселям 3×3)

Река	Весна	Лето	Осень
Толгоболка	0,210 ± 0,015	0,258 ± 0,018	0,251 ± 0,018
Нора	0,189 ± 0,014	0,296 ± 0,020	0,290 ± 0,019
Дунайка	0,257 ± 0,015	0,268 ± 0,020	0,267 ± 0,018
Которосль	0,469 ± 0,025	0,474 ± 0,026	0,456 ± 0,024
Урочь	0,480 ± 0,026	0,540 ± 0,031	0,500 ± 0,027
Шевелюха	0,420 ± 0,022	0,440 ± 0,023	0,430 ± 0,023

Значения NDCI рассчитаны по пикселям 3×3. Приведено среднее ± стандартное отклонение для трех сезонов.

Таблица 3

Результаты интегральной оценки риска эвтрофикации
(на основе данных 2025 года)

Река	Сезон	Основные превышения ПДК NO_2^-, мг/дм^3	Трофический статус по фосфору PO_4^{3-}, мг/дм^3	Максимальный NDCI	Интегральный экологический риск
Толгоболка	Весна	1,07	Эвтрофный 0,21	0,210	Высокий (5 баллов)
	Лето	0,76	Мезотрофный 0,16	0,258	Высокий (4 балла)
	Осень	0,65	Мезотрофный 0,10	0,251	
Нора	Весна	2,32	Олиготрофный 0,04)	0,189	Средний (3 балла)
	Лето	–	Эвтрофный 0,27	0,296	
	Осень		Эвтрофный 0,28	0,290	
Дунайка	Весна	0,10	Олиготрофный 0,03	0,257	Средний (2 балла)
	Лето	0,12	Олиготрофный 0,04	0,268	
	Осень	0,10	Олиготрофный 0,03	0,267	
Которосль	Весна	–	Олиготрофный 0,03	0,469	
	Лето		Олиготрофный 0,03	0,474	
	Осень		Олиготрофный 0,04	0,456	

нитритов, летом и осенью – из-за фосфора. Дунайке присвоен средний риск (2 балла) за счет стабильного, но умеренного нитритного загрязнения. Реки Которосль, Урочь и Шевелюха, несмотря на отсутствие гидрохимических превышений, получили 2 балла вследствие высокого NDCI (> 0,30), что указывает на активное цветение фитопланктона.

Шкала градаций (0–1 – низкий, 2–3 – средний, 4 – 6 – высокий) принята исходя из равномерного деления максимально возможного диапазона (0…6) на три качественных уровня. Фактически полученные значения не превысили 5 баллов, однако верхняя граница «высокого» риска оставлена как 6 для сохранения универсальности шкалы при последующих исследованиях.

Для визуализации различий в уровне нитритного загрязнения между водотоками построена диаграмма размаха (box plot), отражающая распределение концентраций NO_2^- по всем сезонам (рис. 1). Диаграмма наглядно демонстрирует, что реки Толгоболка и Нора характеризуются значительно более высокими и вариабельными значениями, тогда как для Дунайки, Которосли, Урочи и Шевелюхи распределения сжаты в низком диапазоне значений.

Значение нитритов в реке Нора весной (2,32 мг/дм^3) резко выделяется на фоне летних и осенних показателей (0,03 и 0,04 мг/дм^3 соответственно).

На диаграмме размаха это значение отображено как аномальный выброс, что указывает на эпизодический характер азотного загрязнения, вероятно, связанный с сезонным смывом с водосборной территории. Для медианной оценки состояния реки Норы этот пик не учитывался, что позволило избежать искажения статистических характеристик.

Интерпретация результатов

Полученные данные подтверждают, что малые реки в зоне влияния садоводческих товариществ и частной застройки испытывают устойчивую биогенную нагрузку. Реки Толгоболка и Нора выделяются наиболее высокими концентрациями нитритов, что характерно для водотоков, в которые

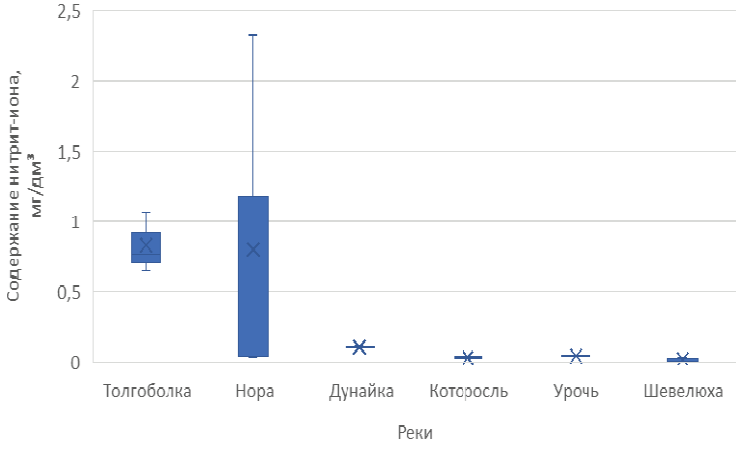


Рис. 1. Распределение концентраций нитрит-иона NO_2^- в приустьевых участках малых рек Ярославля по данным трех сезонов 2025 г. (*n* = 3 для каждой реки)

поступают грунтовые воды и ливневые стоки с территорий, где применяются минеральные и органические удобрения [5]. Весенний экстремум нитритов в Норе (2,32 мг/дм^3) может быть связан со снеготаянием и вымыванием загрязнений с территории полигона ТКО «Скоково», расположенного в верхней части водосбора.

Смена доминирующего фактора риска в реке Норе объясняется различной динамикой поступления: азотные соединения более подвижны и вымываются в половодье, тогда как фосфор накапливается в почвах и поступает с летними дождями. Аналогичные сезонные изменения описаны для рек Европы и США [6, 7].

Наиболее показательным примером ограниченности классического гидрохимического подхода служит река Которосль. При полном соответствии воды рыбохозяйственным нормативам, значения NDCI устойчиво превышают 0,45, что соответствует высокой концентрации хлорофилла-*a* и активному цветению [8]. В данном случае река находится в стадии явной активной эвтрофикации с биогенным лимитированием. Механизм процесса можно описать следующим образом: фитопланктон потребляет соединения азота и фосфора так быстро, что их стационарные концентрации остаются низкими. В таких условиях только спутниковый мониторинг позволяет выявить экологическое неблагополучие. Следовательно, включение NDCI в систему оценки риска оправдано.

Для оценки взаимосвязи между гидрохимическими показателями и спутниковым индексом хлорофилла-*a* рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ. Статистически значимой корреляции между NDCI и концентрацией фосфатов не выявлено ($\rho = -0{,}154$). Это указывает на то, что в исследованных водотоках эвтрофикационные процессы не лимитируются исключительно фосфорным питанием. Полученный результат может объясняться высокой скоростью потребления фосфора фитопланктоном, особенно в летний период, что приводит к его быстрому удалению из водной толщи и, как следствие, отсутствию прямой зависимости между измеренной концентрацией PO_4^{3-} и интенсивностью «цветения» воды, регистрируемой по спутниковому индексу NDCI.

Полученные интегральные баллы позволили ранжировать водотоки по степени уязвимости (рис. 2).

Пространственный анализ позволяет связать зоны повышенных концентраций нитритов и фосфатов с участками береговой линии, занятыми садоводческими некоммерческими товариществами и индивидуальной жилой застройкой, не обеспеченными централизованной системой водоотведения. Наибольшая плотность таких объектов характерна для бассейнов Толгоболки и Норы. Дунайка также подвержена влиянию индивидуальной застройки, но в меньшей степени. Которосль, Урочь и Шевелюха в значительной степени протекают через лесопарковые зоны, что объясняет их относительно чистое гидрохимическое состояние, однако высокие значения спектрального индекса в Которосли могут быть связаны с эвтрофикацией в черте города, куда попадают стоки ливневой канализации.

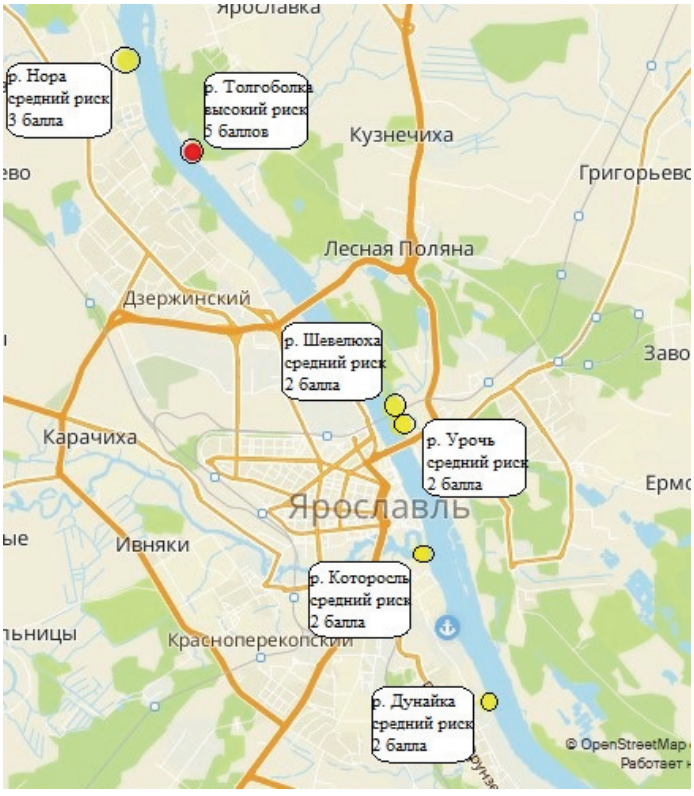


Рис. 2. Карта-схема интегральной оценки экологического риска эвтрофикации малых рек-притоков Волги в городской черте Ярославля (по данным 2025 г.)
(цветом показан уровень риска: красный – высокий (4–5 баллов),
желтый – средний (2–3 балла. Точки соответствуют приустьевым участкам рек)

Практические рекомендации

В порядке обобщения выводов, полученных в ходе пилотного этапа балльной оценки рисков, выстраивается следующая иерархия природоохранных интервенций. Ранжирование объектов осуществляется по степени уязвимости водных систем к антропогенной нагрузке.

Высокий уровень риска. Наиболее критическая ситуация фиксируется для русла Толгоболки. В качестве первоочередной меры здесь рассматривается оценка технического состояния локальных канализационных систем садоводческих товариществ: предметом анализа выступает как возможность внедрения автономных очистных мощностей, так и перспектива подключения к магистральной канализации. Параллельно с этим предусматривается обустройство прибрежных защитных полос, выполняющих барьерную функцию.

Средняя степень риска. Для водотоков Норы, Дунайки и Которосли определен дифференцированный подход. В случае с Норой акцент сделан на восстановительных работах в зоне размещения твердых коммунальных отходов с обязательным контролем состояния подземных горизонтов. Дунайка требует точечного взаимодействия с домовладениями частного сектора для выявления несанкционированных сбросов. Мониторинг реки

Которосль предполагается вести дистанционно, посредством регулярной спутниковой съемки с вычислением нормализованного дифференцированного индекса хлорофилла NDCI, а также проведением инспекций дождевых коллекторов.

Низкая уровень риска. В отношении малых рек Урочь и Шевелюха достаточным признается поддерживающий формат наблюдений без активного вмешательства.

Перспективы развития системы оценки риска

Переход от апробированной локальной схемы к полноформатной превентивной стратегии сопряжен с выполнением ряда условий, обеспечивающих достоверность оценок. Прежде всего, требуется накопление временного ряда данных, охватывающего не менее двух-трех годичных циклов с поквартальной разбивкой. Для верификации спутниковых данных требуется сопоставление с результатами наземных измерений. Параллельно ставится задача построения гидрологической модели, позволяющей перейти к количественному выражению биогенной нагрузки. Дополнительным направлением видится тестирование спектральных модификаций (индексов CIcyano и MCI), призванных повысить точность идентификации фитопланктонных сообществ [9, 10].

Заключение

Впервые для малых притоков Волги в районе Ярославля проведена апробация трехкомпонентной системы оценки риска эвтрофикации, объединяющей гидрохимический анализ, ГИС-картографирование и спутниковый индекс NDCI.

Выявлены устойчивые превышения $ПДК_{рх}$ по нитрит-иону в реках Толгоболке (до 1,07 мг/дм^3), Дунайке (до 0,12 мг/дм^3) и экстремальный сезонный пик в Норе (2,32 мг/дм^3 весной). Трофический статус по фосфору варьирует от олиготрофного до эвтрофного (0,03…0,28 мг/дм^3).

Интегральный индекс риска RS позволил ранжировать водотоки: высокий риск – Толгоболка (4–5 баллов), средний – Нора, Дунайка, Которосль (2–3 балла), низкий – Урочь, Шевелюха (1–2 балла).

Показано, что спутниковый NDCI выявляет активное цветение фитопланктона (Которосль, NDCI > 0,45) даже при отсутствии гидрохимических превышений, что обосновывает необходимость включения дистанционного зондирования в систему регионального мониторинга.

Предложенная методология может быть использована органами местного самоуправления для предварительного зонирования территории и планирования водоохранных мероприятий.

Финансирование

Настоящее исследование не получило внешнего финансирования.

Funding

The present study did not receive any external funding.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Селищев, Е. Н. Географический анализ урбанизированного развития Ярославской области / Е. Н. Селищев // Территориальная организация общества и управление в регионах : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Воронеж, 17–18 мая 2018 года. – Воронеж, 2018. – С. 110–113.

2. Геоэкологическая оценка современного влияния урбосреды на качество речных вод / Г. В. Крыжановская, И. С. Шарова, М. С. Безуглова [и др.] // Геология, география и глобальная энергия. – 2021. – № 1(80). – С. 131–137.

3. Слабунова, А. В. О проблеме диффузного загрязнения водных объектов / А. В. Слабунова, А. П. Суровикина // Мелиорация и гидротехника. – 2020. – № 2(38). – С. 124–139. doi: 10.31774/2222-1816-2020-2-124-139

4. Mishra, S. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters / S. Mishra, D. R. Mishra // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 117. – P. 394–406. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.016

5. Леднева, Н. Х. Антропогенное влияние на биогеохимик) азота и фосфора в городских водных объектах (на примере городов Санкт-Петербург и Астрахань) / Н. Х. Леднева, Е. Г. Локтионова // Современные проблемы этноэкологии и традиционного природопользования : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Улан-Удэ, 06–07 декабря 2007 года. – Улан-Удэ, 2007. – С. 129–131.

6. Seasonal Variability and Hydrological Patterns Influence the Long-Term Trends of Nutrient Loads in the River Po / E. Cavallini, P. Viaroli, M. Naldi, M. Saccò, A. Scibona, E. Barbieri, S. Franceschini, D. Nizzoli // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 18. – Art. 2628. doi: 10.3390/w16182628

7. Seasonal and spatial patterns in phosphorus and nitrogen delivery: Implications for monitoring and management / M. C. Eimers, J. P. Anderson, A. M. Paterson, A. J. Williams, D. Fred // Journal of Great Lakes Research. – 2025. – Vol. 51, No. 6. – Art. 102581. doi: 10.1016/j.jglr.2025.102581

8. Сафиуллин, Э. М. Применение геоинформационных систем при оценке экологического состояния рек / Э. М. Сафиуллин, О. В. Ладыгина // Экология и природопользование: прикладные аспекты : сборник трудов конференции. – Уфа, 2025. – С. 117–122.

9. Evaluation of a satellite-based cyanobacteria bloom detection algorithm using field-measured Microcystin data / S. Mishra, R. P. Stumpf, B. Schaeffer, P. J. Werdell, K. A. Loftin, A. Meredith // The Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 774. – Art. 145462. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145462

10. Горбунова, Т. Л. Использование биотических индексов IMC и QIMC для оценки экологического состояния водотоков горного и предгорного кластера на примере рек на территории большого Сочи / Т. Л. Горбунова // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 2. – С. 110–117.

References

1. Selishchev E.N. *Territorial'naya organizatsiya obshchestva i upravleniye v regionakh: Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Territorial organization of society and management in the regions: Proceedings of the XII All-Russian scientific-practical conference with international participation], Voronezh, 2018, pp. 110-113. (In Russ.)

2. Kryzhanovskaya G.V., Sharova I.S., Bezuglova M.S., et al. [Geoecological assessment of the current impact of the urban environment on the quality of river waters], *Geologiya, geografiya i global'naya energiya* [Geology, Geography and Global Energy], 2021, no. 1(80), pp. 131-137. (In Russ.)

3. Slabunova A.V., Surovikina A.P. [On the problem of diffuse pollution of water bodies], *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], 2020, no. 2(38), pp. 124-139. doi: 10.31774/2222-1816-2020-2-124-139 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 117, pp. 394-406. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.016

5. Ledneva N.Kh., Loktionova E.G. *Sovremennyye problemy etnoekologii i traditsionnogo prirodopol'zovaniya: materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Modern problems of ethnoecology and traditional nature management: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with international participation], Ulan-Ude, 2007, pp. 129-131. (In Russ.)

6. Cavallini E., Viaroli P., Naldi M., Saccò M., Scibona A., Barbieri E., Franceschini S., Nizzoli D. Seasonal Variability and Hydrological Patterns Influence the Long-Term Trends of Nutrient Loads in the River Po. *Water*, 2024, vol. 16, no. 18, art. 2628. doi: 10.3390/w16182628

7. Eimers M.C., Anderson J.P., Paterson A.M., Williams A.J., Fred D. Seasonal and spatial patterns in phosphorus and nitrogen delivery: Implications for monitoring and management, *Journal of Great Lakes Research*, 2025, vol. 51, no. 6, art. 102581. doi: 10.1016/j.jglr.2025.102581

8. Safiullin E.M., Ladygina O.V. [Application of geographic information systems in assessing the ecological state of rivers], *Ekologiya i prirodopol'zovaniye: prikladnyye aspekty* [Ecology and nature management: applied aspects], Ufa, 2025, pp. 117-122. (In Russ.)

9. Mishra S., Stumpf R.P., Schaeffer B., Werdell P.J., Loftin K.A., Meredith A. Evaluation of a satellite-based cyanobacteria bloom detection algorithm using field-measured Microcystin data, *The Science of The Total Environment*, 2021, vol. 774, art. 145462 doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145462

10. Gorbunova T.L. [Use of biotic indices IMC and qimc to assess the ecological state of watercourses in the mountain and foothill cluster on the example of rivers in the Greater Sochi area], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2019, no. 2, pp. 110-117. (In Russ., abstract in Eng.)

Сведения об авторах

Сафиуллин Эдуард Маратович – аспирант кафедры «Охрана труда и природы», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация; ORCID 0009-0002-3988-2242; e-mail: safiullinedik@yandex.ru

Ладыгина Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент института инженеров строительства и транспорта, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация; ORCID 0009-0009-6625-5659; e-mail: ladyginaov@ystu.ru

Насибов Табриз Рафик оглы – аспирант кафедры «Охрана труда и природы», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация; ORCID 0009-0007-8787-7874; e-mail: nasibov_tabriz@mail.ru,

About the authors

Eduard M. Safiullin – Postgraduate Student of the Department of Labour and Environmental Protection, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation; ORCID 0009-0002-3988-2242; e-mail: safiullinedik@yandex.ru

Olga V. Ladygina – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at the Institute of Civil Engineering and Transport, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation; ORCID 0009-0009-6625-5659; e-mail: ladyginaov@ystu.ru

Tabriz R. Nasibov – Postgraduate Student of the Department of Labour and Environmental Protection, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation; ORCID 0009-0007-8787-7874; e-mail: nasibov_tabriz@mail.ru

Дата поступления 11.07.2026;
после рецензирования 20.08.2026;
дата принятия 01.09.2026

© Сафиуллин Э. М., Ладыгина О. В., Насибов Т. Р., 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/