

Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 324—336.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(79):324—336.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [502.51:504](282.247.415.84)(282.247.416.1)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-324-336

Особенности формирования внешней биогенной нагрузки равнинных водохранилищ (на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан)

***Елена Анатольевна Минакова¹, Анатолий Петрович Шлычков¹,
Сергей Алексеевич Кондратьев², Дарья Александровна Минакова¹***

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия, ekologyhel@mail.ru

² Институт озерадения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Аннотация. Приведены результаты оценки основных факторов внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах Республики Татарстан (РТ) за период с 2001 г. по 2019 г., проведенные с использованием усовершенствованной модели *ILLM*. Выявлено, что величина вклада в биогенную нагрузку от диффузных источников составляет 92 % *N* и 90 % *P*; от организованных источников 8 % *N* и 10 % *P*. Рассчитана доля вклада исследуемых факторов в совокупную диффузную биогенную нагрузку. Впервые для Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ установлено, что основными факторами, определяющими формирование диффузной биогенной нагрузки *N* являются массообмен с атмосферой (45 %) и побочные продукты животноводства (30 %); основными факторами, определяющим формирование диффузной биогенной нагрузки *P* являются побочные продукты животноводства (85 %) и массообмен с атмосферой (10,2 %).

Ключевые слова: водохранилище, водосбор, внешняя биогенная нагрузка, азот, фосфор, модель, организованные и диффузные источники.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан.

Для цитирования: Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Минакова Д. А. Особенности формирования внешней биогенной нагрузки равнинных водохранилищ (на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан) // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 324—336. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-324-336.

© Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Минакова Д. А., 2025

Original article

Features of the formation of external nutrient load of lowland reservoirs (using the example of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan)

***Elena A. Minakova¹, Anatoly P. Shlychkov¹, Sergey A. Kondratyev²,
Daria A. Minakova¹***

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²The Institute of Lake Science Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Summary. The paper discusses an approach to quantitatively assessing the key factors of external nutrient load on lowland reservoirs using mathematical modeling methods based on an improved version of the Institute of Limnology Load Model (ILLM). The improved model incorporates new modules, including a mass exchange with the atmosphere to account for atmospheric deposition of biogenic elements and calculating the load generated by diffuse runoff from urbanized areas, considering nutrient inputs from urban and rural populations. The improved ILLM model is an intermediate variant between empirical models with lumped parameters and physical-mathematical models with distributed parameters. A database titled “External Nutrient Load on Surface Waters of the Kuibyshev and Nizhnekamsk Reservoirs within the Republic of Tatarstan (RT)” has been created to support the model with data. Using the enhanced ILLM model, a quantitative assessment was conducted, and the contribution of point and diffuse sources to external biogenic load formation in the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the RT was calculated for the period 2001–2019. The nutrient elements studied in this work include nitrogen (N) and phosphorus (P) compounds. The article presents the results of assessing the contribution share of the key factors to the external nutrient load. It was found that diffuse sources account for 92 % of N and 90% of P in the nutrient load, while point sources contribute 8 % of N and 10 % of P in the nutrient load. The share of various factors in the overall diffuse nutrient load on the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within RT was calculated for the first time. These factors include atmospheric technogenic deposition, by-products of animal husbandry, runoff from agricultural lands, natural underlying surfaces, runoff from urbanized areas, and load from populations living in non-severed areas. It was established that the key factors determining the formation of diffuse N nutrient load are mass exchange with the atmosphere (45 %) and by-products of animal husbandry (30 %). The main factors influencing the formation of diffuse P nutrient load are by-products of animal husbandry (85 %) and mass exchange with the atmosphere (10.2 %).

Keywords: reservoir, catchment area, external nutrient load, nitrogen, phosphorus, model, organized and diffuse sources.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the of the Grant of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan.

For citation: Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondratyev S.A., Minakova D. A. Features of the formation of external nutrient load of lowland reservoirs (using the example of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(79):(324—336). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-324-336. (In Russ.).

Введение

Изучение процессов формирования биогенной нагрузки на водные объекты для разработки способов ее снижения — это актуальная проблема геоэкологии как с научной, так и практической точки зрения. Химический состав вод определяется совокупностью физических, химических и биологических процессов, происходящих на водосборе и в самом водоеме [1]. В естественных условиях биогенные элементы поступают в водоемы в результате природных процессов, благодаря чему поддерживается равновесие между поступлением химических элементов в воду и выведением их из нее. В настоящее время на водоемы и водотоки, помимо природных, воздействуют антропогенные факторы, ускоряющие процессы протекания эвтрофирования [2]. Антропогенное воздействие приводит к нарушению гомеостаза водных экосистем и биохимических циклов, особенно в замкнутых и полужамкнутых водоемах и выражается в увеличении потоков вещества и возрастанием биохимической активности, а также нарушением циклов биогенных элементов [3]. Основная опасность эвтрофирования состоит в том, что это явление труднообратимо. Процесс антропогенного эвтрофирования является следствием нарушения устойчивости системы «водосбор–водный объект» под воздействием антропогенных факторов [4]. В конечном итоге эвтрофирование приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреационного потенциала водоемов, оказывает негативное влияние на системы очистки воды питьевого водоснабжения [5, 6].

Цель настоящей работы — количественная оценка современного уровня внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды и научно-методическое обоснование системы регулирования нагрузки на водосборах крупных равнинных водохранилищ Европейской части России на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан (РТ).

Материалы и методы

Объектом исследования является сложная антропогенно-нарушенная водная система Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ в современных изменяющихся природно-антропогенных условиях. Выбор водосборов Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в качестве объекта исследования для изучения формирования внешней биогенной нагрузки и разработки водоохраных мероприятий по снижению антропогенного эвтрофирования обусловлен их важным социально-экономическим значением.

В качестве исходной информации для формирования базы данных использованы следующие источники:

— обобщенные данные о биогенных элементах в составе сбросов по водным объектам и муниципальным районам РТ, содержащиеся в форме статистической отчетности № 2ТП (водхоз) «Сведения об использовании воды»;

— режимная гидрологическая, гидрохимическая информация, информация об атмосферных выпадениях Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ;

— данные наблюдений за загрязнением вод Куйбышевского водохранилища Филиала «Средволгаводхоз» ФГБУ «Центррегионводхоз» Федерального агентства водных ресурсов;

— Государственные доклады Министерства экологии и природных ресурсов РТ «О состоянии природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Татарстан»;

— материалы Министерства сельского хозяйства и продовольствия РТ;

— материалы Министерства лесного хозяйства РТ;

— материалы Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по РТ;

— данные собственных натурных полевых исследований о расходах и удельном стоке биогенных элементов в реках Казанка, Свяяга, Б. Черемшан, Меша;

— данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки площадей основных типов ландшафтов и калибровки модели.

В качестве исследуемых биогенных элементов в работе рассмотрены соединения азота и фосфора. Данные биогенные элементы входят в Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (утв. Распоряжением Правительства РФ от 23.12.2023 N 3885-р, от 05.06.2024 № 1415-р).

В процессе предварительной подготовки данных проводилась их статистическая обработка с использованием методов анализа, приведенных в [7—9]. Для определения количественных связей между значениями исследуемых величин применяли метод множественной линейной корреляции. Качественная оценка корреляционных зависимостей осуществлялась по показателю тесноты связи R^2 с использованием шкалы Р. Чеддока [10]. Для анализа совокупности натурных наблюдений, не отвечающих нормальному закону распределения, использовались непараметрические методы.

Результаты и их обсуждение

Суммарная нагрузка биогенных элементов на водный объект формируется из двух составляющих (рис. 1): внутренняя биогенная нагрузка (автохтонная); внешняя нагрузка (аллохтонная).

Внутренняя биогенная нагрузка формируется за счет вторичного загрязнения путем поступления в водный объект минеральных форм биогенных элементов из донных отложений с последующим вовлечением их в биотический круговорот и в поверхностные воды [11]. Внешняя биогенная нагрузка формируется за счёт выноса химических веществ с водосбора водного объекта в результате воздействия природных и антропогенных факторов [12, 13]. Эвтрофирование в большей части определяется не содержанием биогенных элементов в водном объекте, а скоростью поступления их извне [14]. Водосбор является геохимическим барьером на пути миграции в водный объект ряда веществ, в том числе и биогенных элементов. Как указано в [15, 16], геохимические барьеры представляют собой участки земной коры, где на ограниченном расстоянии происходит резкое снижение



Рис. 1. Формирование биогенной нагрузки на водные объекты.

Fig. 1. Formation of nutrient load on water bodies.

интенсивности миграции химических элементов. Поступившие на водосбор биогенные элементы претерпевают процессы трансформации и нейтрализации. Часть биогенных элементов не достигает замыкающих створов крупных водных объектов, так как удерживается на водосборе за счет действия различных факторов. Внешняя нагрузка на водные объекты является постоянно действующим фактором, определяющим качество поверхностных вод и влияющим на химический состав донных отложений [17]. Согласно современным научным воззрениям [12, 18—21], основное внимание, в первую очередь, следует сосредоточить на изучении внешней биогенной нагрузки на водосборе.

Оценка внешней биогенной нагрузки на водные объекты представляет собой сложную задачу. Для расчета внешней биогенной нагрузки на водные объекты в работе использована усовершенствованная модель выноса растворенных примесей с водосбора и формирования внешней нагрузки на водный объект *Institute of Limnology Load Model (ILLM)*. Основу модели составляет системный анализ как один из наиболее перспективных методов оценки внешней биогенной нагрузки бассейнов речных геосистем, основанный на синтезе геоситуационной концепции и ландшафтно-экологического подхода [22], базирующийся на математическом моделировании природных процессов, принципах геоэкологической оценки качества окружающей среды и рационального природопользования природно-антропогенных объектов и процессов. Используемая в настоящей работе модель *ILLM* является промежуточным вариантом между эмпирическими моделями с сосредоточенными параметрами и физико-математическими моделями с распределенными параметрами [13].

Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой внешней нагрузки на водные объекты, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения и прогнозом ее изменения под влиянием возможных природно-антропогенных факторов. Модель учитывает вклад организованных и диффузных источников в формирование биогенной нагрузки на водосборе, позволяет рассчитывать вынос элементов с водосбора в водный объект с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью [23]. В используемой версии модели

для оценки биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных угодьях, применен метод, предложенный специалистами ИАЭП [24]. Метод позволяет проводить расчет выноса биогенных элементов с учетом доз внесения удобрений, типов почв, слагающих сельскохозяйственный водосбор, их механического состава, удаленности поля от водного объекта.

Модель имеет модульную структуру. Согласно принятой в модели схеме расчета, основными составляющими внешней биогенной нагрузки на водный объект являются: диффузная природная биогенная нагрузка с подстилающей поверхности различных типов естественных ландшафтов; диффузная антропогенная биогенная нагрузка; удержание биогенных элементов водосбором и его гидрографической сетью; сбросы организованных источников непосредственно в водный объект. Конечный итог моделирования — количественная оценка внешней биогенной нагрузки на водные объекты и отдельных ее составляющих.

В соответствии с требованиями решаемой задачи модель *ILLM* была усовершенствована путем включения в нее новых расчетных модулей [25]:

— «массообмен с атмосферой» для оценки атмосферных выпадений биогенных элементов;

— «расчет нагрузки, сформированной рассредоточенным стоком с урбанизированных территорий», обусловленной поступлением биогенных элементов от городского и сельского населения.

В общем виде модель представлена следующей формулой:

$$L = (L_{nat\ diff} + L_{antr\ diff})(1 - k_r) + L_{w1}, \quad (1)$$

где L — внешняя биогенная нагрузка на водный объект, т/год; $L_{nat\ diff}$ — диффузная природная биогенная нагрузка с подстилающей поверхности различных типов естественных ландшафтов, т/год; $L_{antr\ diff}$ — диффузная антропогенная биогенная нагрузка, т/год; k_r — коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью; L_{w1} — сбросы организованных источников непосредственно в водный объект, т/год.

Схема усовершенствованной модели *ILLM*, используемой для расчета внешней биогенной нагрузки на водные объекты в настоящем исследовании, приведена на рис. 2 [25].

Выбор модели *ILLM* обусловлен наличием модульной структуры, позволяющей учитывать вновь выявленные факторы диффузной нагрузки. Необходимое условие практического применения модели *ILLM* на водных объектах — наличие информации об основных источниках нагрузки на водосборе. Модель ориентирована на данные, приведенные в официальных источниках и формах государственной статистической отчетности министерств и ведомств РФ (государственный мониторинг водных объектов, статистическая отчетность о сбросах сточных вод, данные о сельскохозяйственной деятельности на водосборах). Модель *ILLM* прошла опробование и верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западной части Европейской территории РФ (оз. Ладожское и рр. Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка), а также в Западной Сибири РФ (рр. Иртыш, Тобол, Ишим, Омь, Конда).

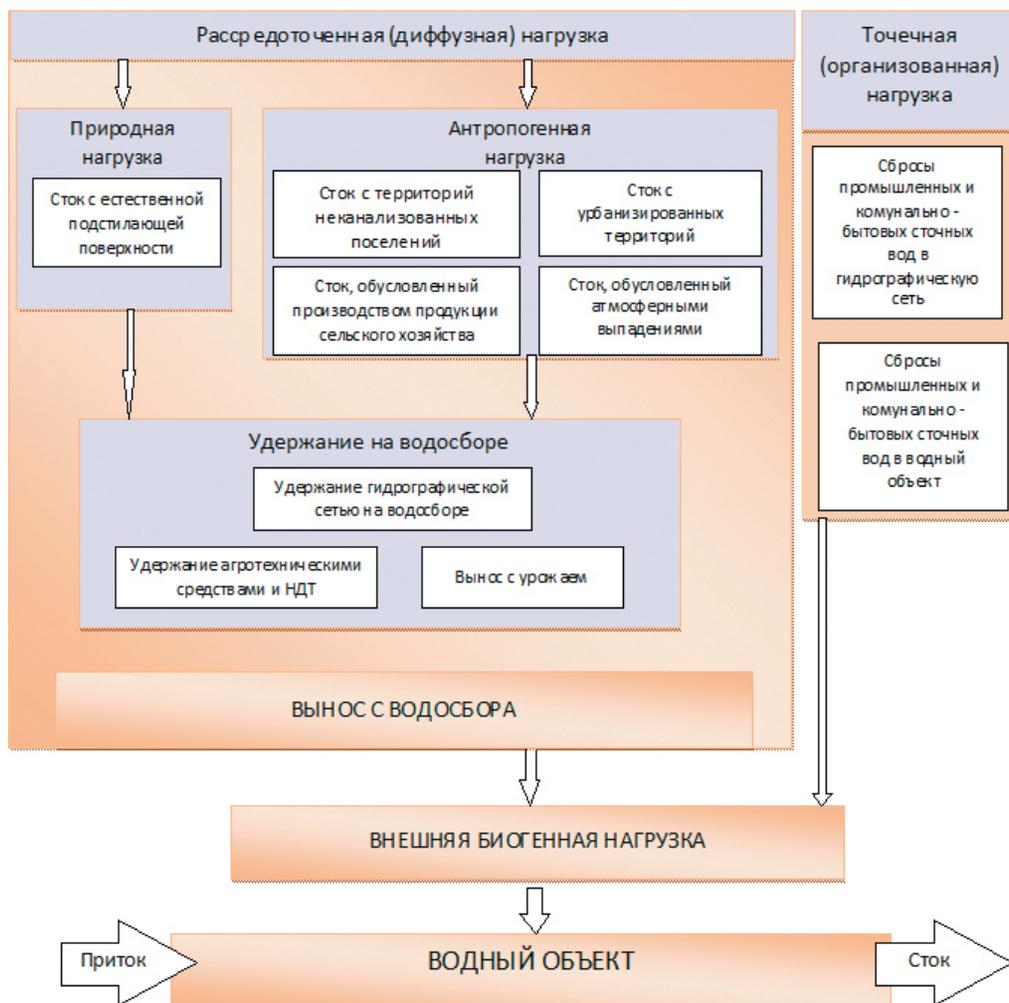


Рис. 2. Схема усовершенствованной математической модели ILLM [25].

Fig. 2. Scheme of the improved mathematical model ILLM [25].

Расчеты выноса химических элементов с водосбора и формирование внешней нагрузки на водные объекты в модели могут выполняться как с годовым, так и с месячным шагами по времени. Ввиду того, что модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения некоторой части входных данных, имеющих годовое осреднение, в качестве расчетного интервала в настоящей работе принят 1 год.

Для информационного обеспечения исследования создана база данных «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан», содержащая информацию

о природных и антропогенных факторах, обуславливающих формирование внешней биогенной нагрузки (природно-климатические условия, гидрологический и гидрохимический режим, источники точечной и диффузной биогенной нагрузки), а также материалы проведенной количественной оценки с использованием усовершенствованной модели *ILLM* основных составляющих внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период с 2001 г. по 2019 г. Расчеты внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ проводились для соединений азота в пересчете на общий азот (*N*) и соединений фосфора в пересчете на общий фосфор (*P*).

С использованием усовершенствованной модели *ILLM* за период с 2001 г. по 2019 г. выполнена количественная оценка основных составляющих внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты количественной оценки
основных составляющих внешней биогенной нагрузки
на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ

Results of quantitative assessment of the main components of external nutrient load on the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the borders of the Republic of Tatarstan

Основные составляющие внешней биогенной нагрузки	тыс. т <i>N</i> /год	тыс. т <i>P</i> /год
Антропогенная нагрузка	92,8	18,7
Природная нагрузка	16,3	0,1
Диффузная биогенная нагрузка на водосбор	109,1	18,8
Удержание биогенной нагрузки на водосборе	65,5	13,5
Вынос биогенных элементов с водосбора	43,6	5,3
Организованная антропогенная нагрузка	3,9	0,6
Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды	47,5	5,9

Выявлено, что на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ удерживается 60 % *N* и 72 % *P* от совокупной массы диффузной биогенной нагрузки. Установлено, что основной вклад в формирование внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ вносит диффузная нагрузка, доля вклада составляет 92 % *N* и 90 % *P*.

Рассчитана масса (в тыс. т/год) и доля вклада (в %) в совокупную диффузную биогенную нагрузку (табл. 2, 3) на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ под действием следующих факторов:

- аэротехногенные выпадения;
- побочные продукты животноводства;
- поступление с сельскохозяйственных угодий;
- сток с естественной подстилающей поверхности;
- сток с урбанизированных территорий;
- нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах.

Таблица 2

Масса и доля вклада основных факторов в диффузную биогенную нагрузку N на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ
 Mass and share of the contribution of the main factors to the diffuse nutrient load of N in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the boundaries of the Republic of Tatarstan

Основные факторы биогенной нагрузки	тыс. т /год	%
Аэротехногенные выпадения	49,5	45,4
Побочные продукты животноводства	33,0	30,2
Поступление с сельскохозяйственных угодий	8,2	7,5
Сток с естественной подстилающей поверхности	16,3	14,9
Сток с урбанизированных территорий	0,7	0,6
Нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах	1,5	1,4
Всего на водосборе	109,1	100

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует, что формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки N на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ в основном определяется аэротехногенными выпадениями (45,4 %) и влиянием побочных продуктов животноводства (30,2 %). Существенный вклад в поступление N вносит сток с естественной подстилающей поверхности (14,9 %), а также поступление с сельскохозяйственных угодий (7,5 %). Поступление N со стоком с урбанизированных и неканализованных территориях поселений является незначительным и составляет в совокупности около 2 %.

Таблица 3

Масса и доля вклада основных факторов в диффузную биогенную нагрузку P на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ
 Mass and share of the contribution of the main factors to the diffuse nutrient load of P in the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk reservoirs within the boundaries of the Republic of Tatarstan

Основные факторы биогенной нагрузки	тыс. т /год	%
Аэротехногенные выпадения	1,9	10,2
Побочные продукты животноводства	16,0	85,1
Поступление с сельскохозяйственных угодий	0,5	2,6
Сток с естественной подстилающей поверхности	0,1	0,4
Сток с урбанизированных территорий	0,04	0,2
Нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах	0,3	1,5
Всего на водосборе	18,8	100

Анализ данных табл. 3 позволил сделать вывод, что формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки P на водосборах Куйбышевского и Нижнекамское водохранилищ в границах РТ определяется воздействием побочных

продуктов животноводства (85,1 %), аэротехногенными выпадениями (10,2 %). Вклад от поступления с сельскохозяйственных угодий составляет 2,6 %, вклад нагрузки от населения, проживающего на неканализованных территориях поселений, составляет 1,5 %, вклад от естественной подстилающей поверхности и стоков с урбанизированных территорий является незначительным (0,4 % и 0,2 %, соответственно).

Заключение

1. В настоящей работе впервые с использованием усовершенствованной модели *ILLM* для водосборов Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ получены новые данные об основных составляющих внешней биогенной нагрузки в современных условиях. Установлено, что диффузная нагрузка является основным источником внешней биогенной нагрузки, определяющим поступление N и P . Проведенная оценка доли вклада организованных и диффузных источников биогенной нагрузки в общую массу поступления биогенных элементов (N и P) в Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ показала, что величина вклада в биогенную нагрузку на водные объекты составляет:

- от диффузных источников 92 % N и 90 % P ;
- от организованных источников 8 % N и 10 % P .

2. С использованием модели *ILLM* рассчитан вклад исследуемых факторов в совокупную диффузную биогенную нагрузку на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ.

3. Выявлено, что формирование диффузной биогенной нагрузки N на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ определяется аэротехногенными выпадениями (45,4 %) и побочными продуктами животноводства (30,2 %). Существенный вклад в поступление N вносит сток с естественной подстилающей поверхности (14,9 %), а также поступление с сельскохозяйственных угодий (7,5 %). Поступление N со стоком с урбанизированных и неканализованных территорий является незначительным и составляет в совокупности около 2 %.

4. Установлено, что основным фактором, оказывающим влияние на формирование диффузной биогенной нагрузки P на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ являются побочные продукты животноводства 85,1 % и аэротехногенные выпадения 10,2 %. Вклад от поступления с сельскохозяйственных угодий 2,6 %, вклад нагрузки от населения, проживающего в неканализованных районах, составляет 1,5 %, вклад от естественной подстилающей поверхности и стоков с урбанизированных территорий является незначительным и составляет 0,4 % и 0,2 %, соответственно.

Список литературы

1. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 296 с.
2. Vitousek P. M., Mooney H. A., Lubchenco J. et al. Human domination of Earth's ecosystems // Science. 1997. Vol. 5325. P. 494—499. doi:10.1007/978-0-387-73412-5_1.

3. Максимова М. П. Океанология — наука системная (парадигма, концепция, методология и методика интегральной оценки функционирования морских экосистем как единого целого) // Географическая среда и живые системы. 2013 (3). С. 118—135.
4. Решетняк О. С. Антропогенная нагрузка на водные экосистемы реки Колымы // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 47—52.
5. Сиренко Л. А., Гавриленко М. Я. Цветение воды и эвтрофирование. Киев: Наук. думка, 1978. 230 с.
6. Paerl H. W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters // Limnol. Oceanogr. 1988. Vol. 33, №4 (2). P. 823—847.
7. Левич А. П. Экологические подходы к регулированию типов цветения эвтрофных водоемов // Доклады Академии наук. 1995. Т. 341 (1). С. 130—133.
8. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
9. Горлач В. В., Егоров В. Л., Иванов Н. А. Обработка, представление, интерпретация результатов измерений: Учебное пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. 83 с.
10. Chaddock R. E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company, 1925. 471 p.
11. Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 232 с.
12. Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
13. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
14. Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 205 с.
15. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
16. Перельман А. И. Геохимия природных вод. М.: Наука, 1982. 150 с.
17. Ершова А. А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Невы в восточную часть Финского залива: автореферат дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. Санкт-Петербург, 2013. 28 с.
18. Науменко М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. Учебное пособие. СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. 100 с.
19. Ясинский С. В., Гуров Ф. Н. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Водное хозяйство России. 2006. № 2. С. 63—91. doi: 10.31857/S0321-0596462232-244.
20. Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В. и др. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 630—648. doi: 10.31857/S0321059620050223.
21. Фрумин Г. Т. Расчет модулей фонового стока биогенных элементов с водосборных бассейнов. СПб.: РГГМУ, 2013. 32 с.
22. Исаченко А. Г. Методы прикладных ландшафтных исследований. М.: Наука, 1980. 263 с.
23. Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Минакова Е. А. и др. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 67—76. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(67-76).
24. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Терехов А. В. и др. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства. 2018. № 3 (96). С.175—185. doi: 10.24411/0131-5226-2018-10071.
25. Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор-водный объект» в современных условиях // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 13—21. doi: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21.

References

1. Alekin O. A. *Osnovy gidrokhimii = Basics of geochemistry*. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1953: 296 p. (In Russ.).

2. Vitousek P. M., Mooney H. A., Lubchenco J. et al. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*. 1997; (5325): 494—499. doi:10.1007/978-0-387-73412-5_1.
3. Maksimova M. P. Oceanology is a systemic science (paradigm, concept, methodology and methods of integrated assessment of the functioning of marine ecosystems as a single whole) *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy = Geographic environment and living systems*. 2013; (3): (118—135). (In Russ.).
4. Reshetnyak O. S. Anthropogenic load on aquatic ecosystems of the Kolyma River. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2015. (2): (47—52). (In Russ.).
5. Sirenko L. A., Gavrilenko M. Y. *Tsveteniye vody i evtrofirovaniye = Algae bloom and eutrophication*. Kyiv: Nauk. Dumka, 1978: 230 p. (In Russ.).
6. Paerl H. W. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters. *Limnol. Oceanogr.* 1988; (33): 823—847.
7. Levich A. P. Ecological approaches to regulation of bloom types in eutrophic water bodies. *Doklady Akademii nauk. = Reports of the Academy of Sciences*. 1995; (341): (130—133). (In Russ.).
8. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika = Applied Mathematical Statistics*. Moscow: Fizmatlit, 2006: 816 p. (In Russ.).
9. Gorlach V. V., Egorov V. L., Ivanov N. A. *Obrabotka, predstavleniye, interpretatsiya rezultatov izmereniy: Uchebnoye posobiye = Processing, presentation, interpretation of measurement results*. Omsk: SibADI Publishing House, 2006: 83 p. (In Russ.).
10. Chaddock R. E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company, 1925: 471 p.
11. Datsenko Yu. S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch: gidrologo-gidrokhimicheskiye aspekty = Eutrophication of reservoirs: hydrological and hydrochemical aspects*. Moscow: GEOS, 2007: 232 p. (In Russ.).
12. Kondratyev S. A. *Formirovaniye vneshney nagruzki na vodoyemy: problemy modelirovaniya = Formation of external load on water bodies: problems of modeling*. St. Petersburg: Nauka, 2007: 253 p. (In Russ.).
13. Kondratiev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor-vodotok-vodoyem = Mathematical modeling of mass transfer in the catchment-watercourse-reservoir system*. St. Petersburg: Nestor-History, 2019: 248 p. (In Russ.).
14. Rossolimo L. L. *Izmeneniye limnicheskikh ekosistem pod vozdeystviyem antropogennogo faktora = Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors*. Moscow: Nauka, 1977: 205 p. (In Russ.).
15. Perelman A. I. *Geokhimiya landshafta = Landscape geochemistry*. Moscow: Higher School, 1975: 342 p. (In Russ.).
16. Perelman A. I. *Geokhimiya prirodnikh vod = Geochemistry of natural waters*. Moscow: Nauka, 1982: 150 p. (In Russ.).
17. Ershova A. A. *Kompleksnaya otsenka postupleniya biogennykh veshchestv s vodosbora reki Neva v vostochnuyu chast' Finskogo zaliva = Comprehensive assessment of the influx of nutrient substances from the Neva River catchment area into the eastern part of the Gulf of Finland*. St. Petersburg, 2013: 28 p. (In Russ.).
18. Naumenko M. A. *Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch = Eutrophication of lakes and reservoirs*. St. Petersburg: Publishing House of the Russian State Hydrometeorological University, 2007: 100 p. (In Russ.).
19. Yasinsky S. V., Gurov F. N. Method for assessing the characteristics of diffuse pollution of small rivers based on the landscape-hydrological approach (using the Istra River as an example). *Vodnoye khozyaystvo Rossii = Water Management of Russia*. 2006; (2): (63—91). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321-0596462232-244.
20. Yasinsky S. V., Kashutina E. A., Sidorova M. V., et al. Anthropogenic load and the influence of the catchment area on the diffuse runoff of biogenic elements into a large water body (using the Cheboksary Reservoir catchment area as an example). *Vodnyye resursy. = Water Resources*. 2020; (47): (630—648). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059620050223.
21. Frumin G. T. *Raschet moduley fonovogo stoka biogennykh elementov s vodosbornykh basseynov = Calculation of modules of background runoff of nutrient elements from catchment basins*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2013: 32 p. (In Russ.).
22. Isachenko A. G. *Metody prikladnykh landshaftnykh issledovaniy = Applied landscape research methods*. Moscow: Nauka, 1980: 263 p. (In Russ.).

23. Pozdnyakov Sh. R., Kondratyev S. A., Minakova E. A. et al. Assessment of the nutrient load on the Kuibyshev Reservoir from the catchment area. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2019; (3): (67—76). (In Russ.). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(67-76).
24. Bryukhanov A. Yu., Vasiliev E. V., Terekhov A. V. et al. Assessment of agricultural nutrient load formed on river catchments of the Kuibyshev Reservoir basin. *Tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rasteniyevodstva = Technologies and technical means of mechanized production of plant products*. 2018; (3): (175—185). (In Russ.). doi: 10.24411/0131-5226-2018-10071.
25. Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondratiev S. A. Migration flows of nutrient elements in the “catchment area-water body” geosystem under modern conditions. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy = Ecology of urbanized territories*. 2022; (2): (13—21). (In Russ.). doi: 10.24412/1816-1863-2022-2-13-21.

Сведения об авторах

Минакова Елена Анатольевна, кандидат географических наук, доцент кафедры биоэкологии, гигиены и общественного здоровья, Казанский (Приволжский) федеральный университет, ekologyhel@mail.ru.

Шлычков Анатолий Петрович, кандидат географических наук, доцент кафедры биоэкологии, гигиены и общественного здоровья Казанский (Приволжский) федеральный университет, anatoliy.shlychkov@yandex.ru.

Кондратьев Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук, Институт озерадения РАН — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, 3718470@gmail.com.

Минакова Дарья Александровна, магистрант Казанский (Приволжский) федеральный университет, lfeyz007@mail.ru.

Information about authors

Minakova Elena Anatolyevna, PhD (Geogr. Sci.), Kazan (Volga Region) Federal University, Associate Professor.

Shlychkov Anatoly Petrovich, PhD (Geogr. Sci.), Kazan (Volga Region) Federal University, Associate Professor.

Kondratiev Sergey Alekseevich, Doctor доктор (Phys. Math. Sci.), Institute of Limnology RAS, Limnology RAS – separate structural subdivision of St. Petersburg Federal Research Centre of RAS, Chief scientist, head of laboratory.

Minakova Daria Alexandrovna, Kazan (Volga Region) Federal University, Master’s degree.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.02.2025

Принята к печати после доработки 11.05.2025

The article was received on 12.02.2025

The article was accepted after revision on 11.05.2025