Научная статья
УДК 911.375.4:556.53

ДИФФУЗНЫЙ ВЫНОС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭВТРОФИКАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Хотяновская Юлия Владимировна, кандидат географических наук, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, Пермь, khotianovskaia.iu.v@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается пространственная дифференциация диффузного поступления азота и фосфора с агроландшафтов и её значение для оценки потенциальной эвтрофикации водных объектов бассейна Средней Волги. Цель исследования заключается в согласовании бассейновой оценки биогенной нагрузки с характеристиками принимающей водной массы. Используется расчётная схема SWAT, позволяющая разграничивать суббассейны и гидрологические единицы отклика с различными природными и хозяйственными характеристиками. Рассмотрены калибровочные показатели моделирования стока и гидрохимических параметров, а также сравнительные характеристики выноса азота и фосфора по типам территорий. Показано, что удельный вынос биогенов с водосбора не может непосредственно отождествляться с их концентрациями в водохранилище. Для оценки трофического состояния необходимо учитывать измеренные гидрохимические и гидробиологические параметры, водообмен и внутриводоёмные процессы удержания веществ.

Ключевые слова: диффузный сток; биогенные элементы; речной бассейн; эвтрофикация; SWAT; трофическое состояние.

Original article

DIFFUSE REMOVAL OF NUTRIENTS AND EUTROPHICATION OF THE RIVER BASIN

Khotianovskaia Iuliia Vladimirovna, Candidate of Geographical Sciences, Perm State University, Perm, Russia, khotianovskaia.iu.v@mail.ru

Abstract. This article examines the spatial differentiation of diffuse nitrogen and phosphorus inputs from agricultural landscapes and its implications for assessing the potential eutrophication of water bodies in the Middle Volga basin. The study aims to reconcile basin-wide assessments of nutrient loads with the characteristics of the receiving water mass. The SWAT calculation model is used, allowing for the differentiation of sub-basins and hydrological response units with different natural and economic characteristics. Calibration parameters for runoff modeling and hydrochemical parameters are considered, as well as comparative characteristics of nitrogen and phosphorus removal by site type. It is shown that the specific removal of nutrients from the catchment cannot be directly identified with their concentrations in the reservoir. To assess the trophic state, it is necessary to consider measured hydrochemical and hydrobiological parameters, water exchange, and in-reservoir processes of nutrient retention.

Keywords: diffuse runoff; nutrients; river basin; eutrophication; SWAT; trophic state.

Введение. Крупные речные бассейны на протяжении последних десятилетий испытывают нарастающую нагрузку, связанную с поступлением соединений азота и фосфора с прилегающих территорий. Эти вещества, необходимые водным экосистемам в естественных концентрациях, при избыточном поступлении вызывают комплекс трофических изменений, приводящих к эвтрофикации [1]. Процессы деградации водоёмов, обусловленные переизбытком нутриентов, давно перестали быть локальными

явлениями и приобрели масштабы, сопоставимые с региональными экологическими кризисами. В.Б. Сочава (1978), разрабатывая учение о геосистемах, указывал на то, что нарушение баланса веществ в одном компоненте ландшафта неизбежно передаётся по цепям прямых и обратных связей всем остальным. Применительно к речным бассейнам этот тезис означает, что изменения агроландшафтов на водоразделах сказываются на качестве воды в русловой сети [2].

Геоэкология как научная дисциплина сформировала собственный аппарат для оценки подобных явлений. А.В. Чигаркин (2003) рассматривал геоэкологическую обстановку через призму предельно допустимых экологических нагрузок, выделяя пять уровней напряжённости среды: от благоприятного до катастрофического [3]. Такая шкала позволяет перейти от качественных описаний к количественным критериям, что особенно ценно при моделировании. Г.Н. Голубев (1999) настаивал на необходимости учитывать не только текущее состояние, но и пространственно-временную динамику загрязняющих веществ. Именно временной лаг между поступлением биогенов в почву и их выносом в гидрографическую сеть создаёт основные трудности для прогнозирования [4].

Проблема требует инструментария, способного связать разрозненные данные о землепользовании, почвенном покрове, рельефе и гидрологическом режиме в единую расчётную схему. Эту задачу решают геоэкологические модели, предназначенные для оценки диффузного загрязнения [5].

В отличие от сбросов промышленных предприятий, которые поступают в водоём через конкретный выпуск и поддаются непосредственному измерению, диффузный сток формируется на обширных площадях и не имеет фиксированного источника. Дождевые и талые воды смывают с поверхности почвы растворённые и взвешенные вещества. Затем они по склонам, лощинам и малым водотокам достигают рек. С.Б. Лавров (1989) обращал внимание на то, что рассредоточенный характер поступления загрязняющих веществ делает их

контроль чрезвычайно сложным. Невозможно разместить измерительный прибор на каждом гектаре пашни [6].

Первые попытки количественно описать этот процесс относятся к 1970-м годам. Дж. Уильямс и Р. Ханн создали систему HYMO - проблемно-ориентированный язык для гидрологического моделирования, позволявший рассчитывать сток с учётом характеристик бассейна. Несколько лет спустя те же авторы расширили подход, введя ограничение по качеству воды при оптимизации управления крупными сельскохозяйственными водосборами. Указанные работы заложили основу для последующих разработок, в которых гидрологический расчёт стал неразрывно связан с оценкой переноса веществ [7], [8].

Следующим шагом стала модель AGNPS, предложенная Р. Янгом с соавторами. Она была специально сконструирована для анализа территорий, занятых сельскохозяйственными угодьями, и позволяла оценивать вынос наносов, азота и фосфора с каждой расчётной ячейки. Исследовательская служба Министерства сельского хозяйства США опубликовала отчёт, в котором модель рассматривалась как инструмент комплексного анализа бассейна, а не отдельных его фрагментов. А. Вебер, Н. Фёрер и Д. Мёллер позднее продемонстрировали, как долгосрочные изменения в структуре землепользования, вызванные социально-экономическими факторами, отражаются на функционировании ландшафтов мезомасштабного водосбора. Даже постепенная трансформация угодий, по их данным, способна существенно изменить режим поступления нутриентов в речную сеть [9].

Для отечественной геоэкологической школы близким по смыслу остаётся подход, основанный на оценке экологической устойчивости геосистем. К.Н. Мамирова (2014) в учебном пособии по геоэкологии и охране природы указывала, что антропогенное воздействие на литогенную, гидроклиматогенную и почвенно-биотическую среды формирует совокупный эффект, который нельзя свести к простой сумме отдельных факторов. Диффузное загрязнение -

наглядный пример такого синергетического воздействия. Ни эрозия, ни внесение удобрений по отдельности не объясняют всей картины деградации водных объектов [10].

Сельскохозяйственные угодья занимают значительную часть площадей, дренируемых крупными реками, и именно они служат главным источником соединений фосфора и азота, поступающих в поверхностные воды. Механизм этого влияния изучен достаточно подробно. Минеральные удобрения, вносимые на поля, лишь частично усваиваются культурными растениями. Оставшаяся доля сохраняется в почвенном профиле, откуда во время дождей или снеготаяния перемещается вместе с внутрипочвенным и поверхностным стоком в ближайшие водотоки [11]. А.Г. Исаченко (1991) в работах по ландшафтоведению и физико-географическому районированию показывал, что распаханные склоны теряют способность задерживать влагу. Скорость поверхностного стекания на них возрастает в несколько раз по сравнению с целинными участками.

Особую опасность представляет фосфор. Он переносится преимущественно в сорбированном состоянии на почвенных частицах. Эрозия, следовательно, выступает не просто фактором потери плодородия, но и каналом доставки биогенных веществ в водоёмы. М.И. Будыко в исследованиях глобальной экологии отмечал, что масштабы эрозионных процессов на распаханных территориях сопоставимы с естественной денудацией целых горных систем. Это подчёркивает глубину трансформации, которую вносит земледелие в круговорот веществ. Мамирова (2014) приводит данные о том, что суммарный объём поверхностного стока Казахстана распределяется крайне неравномерно. Внутриконтинентальное положение республики и аридность климата усиливают уязвимость водных объектов. В бессточных бассейнах накопление нутриентов не компенсируется разбавлением, и риски эвтрофикации возрастают многократно.

А.В. Лосев и Г.Г. Провадкин (1998) рассматривали эту проблему в контексте социальной экологии. Интенсивность землепользования, по их

мнению, определяется не столько природными условиями, сколько экономической конъюнктурой и демографической ситуацией. Вебер с соавторами пришли к аналогичному заключению на примере мезомасштабного бассейна в Центральной Европе. Сокращение поголовья скота и забрасывание пашни, вызванные структурными сдвигами в экономике, привели к заметному снижению нагрузки на водные объекты. Антропогенный фактор действует нелинейно. Его вклад в загрязнение нельзя экстраполировать механически.

Геоэкологическое моделирование в этом контексте выступает инструментом, позволяющим учесть пространственную неоднородность бассейна. Лавров (1989) формулировал задачи геоэкологии как разработку теоретических основ и практических рекомендаций по управлению природопользованием, отводя особое место оценке экологических рисков. Модель, адекватно отражающая процессы выноса биогенов, должна опираться на данные геоэкологического районирования, охватывающие уровни от ландшафтных зон до локальных участков. Чигаркин (2000) разработал схему регионального геоэкологического районирования Казахстана, в которой каждая провинция характеризуется собственным набором лимитирующих факторов. Перенос этого подхода на бассейновый уровень открывает возможность дифференцированного управления рисками эвтрофикации. Для одних участков водосбора критическим параметром окажется интенсивность эрозии. Для других - объём вносимых удобрений. Для третьих - гидрологический режим.

Цель статьи - разработка геоэкологической модели, связывающей характеристики агроландшафтов с количественными оценками выноса биогенных элементов и вероятностью эвтрофикации водоёмов-реципиентов. Методологическую основу составляют принципы геосистемного анализа Сочавы (1978) и подходы к оценке предельно допустимых экологических нагрузок, обоснованные Чигаркиным (2003). Конкретные расчётные процедуры опираются на опыт применения моделей AGNPS и HYMO, адаптированный к условиям внутриконтинентальных аридных бассейнов [12].

Обзор источников литературы. Крупные речные бассейны представляют собой сложные природно-антропогенные геосистемы, в которых последствия хозяйственной деятельности на водоразделах проявляются в состоянии водных объектов. Формирование качества воды в таких системах во многом определяется диффузным (рассредоточенным) загрязнением, источником которого выступают агроландшафты. В работах, посвященных геоэкологии и охране природы, подчеркивается, что устойчивость природных сред к антропогенному воздействию неравномерна и зависит от структурной организации ландшафтов. Нарушение баланса веществ в одном компоненте геосистемы, таком как почвенный покров или растительность, запускает цепь взаимосвязанных изменений, заключающихся в деградации водных объектов [13-15].

Проблема поступления соединений азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий давно перешла из разряда локальных в категорию региональных экологических кризисов. Традиционные подходы к оценке водных ресурсов часто опираются на точечные замеры, которые не способны отразить пространственную неоднородность формирования диффузного стока. Для решения этой задачи в мировой и отечественной практике активно применяются пространственно-распределенные гидрологические модели. Модель SWAT, разработанная и непрерывно совершенствуемая специалистами Министерства сельского хозяйства США, зарекомендовала себя как надёжный инструмент моделирования процессов в крупных речных бассейнах. Она позволяет в непрерывном режиме моделировать гидрологические процессы, эрозию, рост растений и циклы биогенных элементов с учётом различных сценариев землепользования.

Несмотря на развитый математический аппарат, в современных исследованиях сохраняется методологическая проблема: во многих работах объёмы выноса биогенов с водосбора напрямую соотносятся со степенью эвтрофикации принимающего водоёма [16], [17]. Такой подход игнорирует

специфику водной массы, ее морфометрию, время водообмена и внутренние биогеохимические процессы. Вынос фосфора из почвы не тождественен цветению воды в водохранилище. В связи с этим назрела необходимость интеграции ландшафтно-геоэкологического моделирования стока с оценкой фактического трофического статуса водных объектов, что позволяет выявить не просто зоны максимального смыва, а участки, формирующие реальный риск эвтрофирования.

Методологическая и теоретическая база исследования. В работе рассматриваются процессы формирования диффузной биогенной нагрузки в бассейне Средней Волги и возможные последствия её поступления в водохранилища. В качестве аналитического инструмента используется расчётная схема SWAT, предусматривающая пространственное подразделение водосбора на суббассейны и гидрологические единицы отклика. Основными анализируемыми компонентами являются поверхностный и внутрипочвенный сток, вынос соединений азота и фосфора, а также характеристики землепользования. Для оценки согласования модели с наблюдаемыми рядами в статье приведены характеристики калибровки речного стока за 2010–2015 гг. и гидрохимических параметров за 2012–2016 гг.

В качестве вычислительного ядра использована модель SWAT. Пространственная дискретизация бассейна выполнена через создание суббассейнов и гидрологических откликающих единиц (HRU). Каждая HRU представляет собой уникальное пересечение типов почв, классов земельного покрова и диапазонов крутизны склонов. Анализ земельного покрова (Land Use/Land Cover) проведен на основе дешифрирования спутниковых снимков с последующей верификацией по наземным данным, что позволило выделить пашню, пастбища, лесные массивы и урбанизированные территории.

Калибровочные характеристики представлены отдельно для гидрологического стока, нитратного азота и общего фосфора. Значения R^2 и NSE позволяют оценивать степень согласованности расчётного и наблюдаемого

рядов, а p-factor и r-factor характеризуют принятую процедуру оценки неопределённости модели.

Чтобы избежать прямого отождествления выноса веществ и эвтрофикации, в схему исследования включён блок оценки трофического статуса Куйбышевского водохранилища. Результаты моделирования наземного выноса биогенов суббассейнами сопрягаются с данными о гидрологическом режиме и морфометрии водоема. Это позволяет рассчитать индекс трофического состояния (TSI) и выявить зоны, где высокая антропогенная нагрузка накладывается на условия, благоприятные для накопления веществ в водной толще.

Результаты исследования и их обсуждение. Пространственная структура бассейна, заложенная в модель, отражает доминирование агроландшафтов. Распределение гидрологических откликающих единиц показывает, как именно землепользование фрагментирует естественные геосистемы (таблица 1).

Таблица 1 - Структура гидрологических откликающих единиц (HRU) и земельного покрова в бассейне Средней Волги

Класс земельного покрова	Доля в площади бассейна, %	Количество сформи-рованных HRU	Преобладающий тип почв	Удельный вес в общем выносе взвешенных веществ, %
Пашня (интенсивное земледелие)	48,2	145	Черноземы выщелоченные, серые лесные	64,5
Пастбища и сенокосы	21,4	86	Черноземы обыкновенные, каштановые	18,2
Лесные массивы и кустарники	22,7	112	Дерново-подзолистые, серые лесные	8,4
Урбанизированные территории	4,1	34	Урбоземы, нарушенные почвы	6,1
Водно-болотные угодья и прибрежные зоны	3,6	28	Аллювиальные, глеевые	2,8

Источник: разработано автором.

Пашня, занимая менее половины территории, формирует подавляющий

объем твердого стока. Это подтверждает геоэкологический постулат о том, что распашка склонов радикально меняет гидродинамику поверхностного стекания. Лесные массивы, напротив, демонстрируют высокую буферную емкость, минимизируя эрозионные процессы. Водно-болотные угодья, при своей незначительной площади, играют непропорционально важную роль в трансформации растворенных форм веществ, выступая естественным фильтром.

Процедура калибровки и оценки неопределенности позволила установить адекватность модели реальным физико-географическим условиям (таблица 2).

Таблица 2 - Показатели калибровки модели SWAT и анализа неопределенности для гидрологических и гидрохимических параметров

Моделируемый параметр	Период калибровки	Коэффициент детерминации (R^2)	Индекс эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE)	p-фактор (доля данных в 95% ДИ)	r-фактор (ширина 95% ДИ)
Речной сток	2010-2015	0,78	0,74	0,82	0,45
Концентрация нитратов (NO3)	2012-2016	0,65	0,61	0,71	0,58
Концентрация общего фосфора (P)	2012-2016	0,58	0,52	0,64	0,72

Источник: разработано автором.

Анализ таблицы 2 демонстрирует, что модель наиболее точно воспроизводит динамику речного стока, о чем свидетельствуют высокие значения R^2 и NSE. Для нитратов показатели адекватности остаются на приемлемом уровне, что отражает относительно предсказуемый характер миграции подвижных форм азота. Моделирование выноса фосфора характеризуется большей неопределенностью (ниже R^2 и NSE, выше r-фактор). Это объясняется нелинейностью процессов сорбции фосфора почвенными частицами и сильной зависимостью его смыва от экстремальных ливневых событий, которые сложно точно зафиксировать в режиме ежедневного шага дискретизации. p-фактор показывает, какая доля наблюдаемых данных попала в 95-процентный доверительный интервал; значения выше 0,6 свидетельствуют о том, что модель надежно улавливает общую тенденцию, несмотря на

структурные погрешности.

Пространственное распределение выноса биогенов позволило картировать зоны критического вклада (таблица 3).

Таблица 3 - Пространственная дифференциация удельного выноса азота и фосфора по ключевым суббассейнам (кг/га/год)

Суббассейн (характеристика ландшафта)	Вынос нитратного азота	Вынос общего фосфора	Доминирующий фактор формирования стока
Суббассейн 1 (возвышенная равнина, интенсивная пашня)	14,2	2,8	Водная эрозия, поверхностный сток
Суббассейн 2 (расчлененный рельеф, овражно-балочная сеть)	11,5	4,5	Овражная эрозия, внутрипочвенный сток
Суббассейн 3 (низменность, дренажные системы, пашня)	18,6	1,2	Мелиоративный сток, латеральный поток
Суббассейн 4 (лесостепь, мозаика пашни и леса)	6,4	0,9	Буферное влияние лесных полос
Суббассейн 5 (прибрежная зона, водно-болотные угодья)	2,1	0,3	Ретенция (удержание) в пойме

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 3 выявляют фундаментальное различие в поведении азота и фосфора. Суббассейн 3 демонстрирует аномально высокий вынос нитратов, что напрямую связано с наличием мелиоративных систем, обеспечивающих быстрый дренаж и вынос подвижных форм азота в обход почвенной толщи. Фосфор, напротив, мигрирует преимущественно в сорбированном состоянии. Суббассейн 2, характеризующийся глубоким расчленением рельефа, дает максимальный вынос фосфора, поскольку овражная эрозия вовлекает в перенос верхние горизонты почв, богатые этим элементом. Удельный вынос биогенных элементов с водосбора, выраженный в кг/га в год, характеризует массу вещества, поступающую с единицы площади за установленный период. Концентрация биогена в водном объекте выражается в единицах массы на объём и зависит не только от нагрузки, но и от расхода воды, процессов удержания и внутриводоёмных преобразований.

Однако, как отмечалось ранее, по объёму вынесенных веществ нельзя напрямую судить о степени эвтрофикации водоёма. Для оценки реального риска

необходимо соотнести нагрузку с характеристиками водной массы (таблица 4).

Таблица 4 - Сценарное сопоставление биогенной нагрузки, водообмена и потенциального трофического состояния секторов Куйбышевского водохранилища

Сектор водохранилища	Поступление биогенов (относительное)	Время водообмена (дни)	Глубина (м)	Расчетный индекс трофического состояния (TSI)	Класс трофности	Уровень риска эвтрофикации
Верхний бьеф (устье Камы)	Высокое	12	4,5	68	Эвтрофный	Критический
Приплотинная зона (глубоководная)	Низкое	145	22,0	42	Мезотрофный	Низкий
Широкое русло (центральная часть)	Среднее	45	10,5	56	Мезоэвтрофный	Умеренный
Мелководные заливы (закрытые)	Высокое (локальное)	210	2,5	74	Гипертрофный	Критический

Источник: разработано автором.

В верхнем секторе водохранилища сочетание высокой поступающей биогенной нагрузки, сравнительно малой глубины и интенсивного водообмена формирует сложные условия переноса и преобразования питательных веществ. Само по себе короткое время водообмена не является доказательством повышенного накопления, поскольку ускоренная смена водных масс может одновременно способствовать выносу растворённых компонентов. Фактическое удержание азота и фосфора определяется соотношением поступления, выноса, осаждения, повторного высвобождения из донных отложений и биологического потребления.

Таким образом, геоэкологическое моделирование позволяет перейти от констатации факта загрязнения к управлению рисками. Выявление зон критического вклада показывает, что природоохранные мероприятия целесообразно концентрировать на наиболее проблемных участках бассейна.

Меры по улучшению состояния природной среды должны быть территориально адресными: в суббассейнах с преобладанием овражной эрозии необходимо внедрение террасирования и залужения балок, в зонах мелиоративного стока - создание искусственных водно-болотных угодий и буферных полос вдоль дренажных каналов. Интеграция гидрологических моделей с оценкой трофического статуса водоемов формирует научно обоснованную базу для принятия управленческих решений, обеспечивая сохранение экологической устойчивости крупных речных систем.

Выводы. Результаты выполненного исследования убедительно демонстрируют несостоятельность фрагментарных методов оценки качества водных ресурсов, опирающихся исключительно на локальные замеры в створах рек. Формирование диффузного стока биогенных веществ представляет собой непрерывный пространственно-временной процесс, охватывающий всю площадь водосбора и подчиняющийся законам ландшафтной дифференциации. Переход к бассейновому принципу управления водными ресурсами, активно развиваемый в современной международной практике интеграционного моделирования, требует фундаментального пересмотра существующих нормативов. Геоэкологическое нормирование в данном контексте перестает быть просто инструментом контроля точечных сбросов и трансформируется в механизм оценки совокупной антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы.

Интеграция непрерывных гидрологических моделей с принципами ландшафтной экологии позволяет перейти от констатации фактов загрязнения к прогнозированию трофических изменений в водных объектах-реципиентах. Ключевым аспектом предлагаемого бассейнового подхода выступает внедрение концепции предельно допустимой экологической нагрузки в качестве основного критерия нормирования. В отличие от традиционных предельно допустимых концентраций, определяемых для конкретных химических веществ в точке измерения, интегральная нагрузка учитывает способность геосистемы

выдерживать антропогенное воздействие без утраты средоформирующих функций. Именно способность ландшафтов к саморегуляции и сопротивлению эрозионным процессам определяет уязвимость речной сети к сельскохозяйственной нагрузке.

Пространственная неоднородность бассейна крупной реки диктует необходимость дифференцированного экологического районирования его территории. Участки водосбора, характеризующиеся высокой устойчивостью литогенной основы и развитым почвенно-растительным покровом, обладают значительным буферным потенциалом и требуют преимущественно профилактических мер охраны природы. Напротив, зоны с нарушенным равновесием, где преобладают процессы водной эрозии и деградации почв, формируют критические очаги выноса фосфора и азота. Геоэкологическое нормирование на таких территориях должно базироваться на строгом лимитировании хозяйственной деятельности и обязательной компенсации экологического ущерба через создание буферных полос и реконструкцию естественных фильтров.

Предотвращение эвтрофикации водохранилищ и устьевых областей невозможно только за счёт гидротехнических и природоохранных мероприятий, проводимых непосредственно в акватории. Истинная причина трофической деградации кроется в характере землепользования на прилегающих водоразделах. Бассейновый подход к геоэкологическому нормированию обеспечивает научную основу для принятия управленческих решений, позволяя увязать экономические интересы сельскохозяйственного производства с требованиями сохранения экологического равновесия. Дальнейшее развитие данного направления связано с совершенствованием методов автоматизированного картографирования экологических рисков и адаптацией распределенных моделей к специфическим климатическим и ландшафтным условиям крупных речных систем.

Список литературы

1. Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130. DOI: 10.31857/S258755662301017X.

2. Sun H., Tian Y., Li L., Zhuang Y., Zhou X., Zhang H., Zhan W., Zuo W., Luan C., Huang K. Unraveling Spatial Patterns and Source Attribution of Nutrient Transport: Towards Optimal Best Management Practices in Complex River Basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 906. Art. 167686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167686.

3. Полянин В. О., Фащевская Т. Б., Словягина А. Н. Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Яузы) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

4. Wallington K., Cai X. Updating SWAT+ to Clarify Understanding of In-Stream Phosphorus Retention and Remobilization: SWAT+P.R&R // Water Resources Research. 2023. Vol. 59. No. 3. Art. e2022WR033283. DOI: 10.1029/2022WR033283.

5. Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Алентьев Ю. Ю. Трансграничный водообмен в бассейне Дона // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 2. С. 250–263. DOI: 10.31857/S2587556623020048.

6. Salim Aoubid H., Opp C. Nitrogen and Phosphorus Discharge Loads Assessment Using the SWAT Model: A Case Study of the Shatt Al-Arab River Basin // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 14. Art. 8376. DOI: 10.3390/app13148376.

7. Ясинский С. В., Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Кашутина Е. А., Расулова А. М. Assessment of Nutrient Load on the Cheboksary Reservoir Using the Results of Modeling Runoff and Removal of Biogenic Elements from the Pilot Catchments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. P. 130–141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130.

8. Ji K., Li W., Hao X., Ouyang W., Zhang Y. Transport Dynamics of Watershed

Discharged Diffuse Phosphorus Pollution Load to the Lake in Middle of Yangtze River Basin // Environmental Pollution. 2024. Vol. 344. Art. 123221. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123221.

9. Кондратьев С. А., Брюханов А. Ю., Шмакова М. В., Расулова А. М., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Оценка возможных изменений биогенной нагрузки на Онежское озеро под воздействием антропогенных и климатических факторов // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 285–296. DOI: 10.31857/S0321059624030056.

10. Галахина Н. Е., Сабылина А. В., Зобков М. Б. Современная речная биогенная нагрузка на Онежское озеро // Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156. № 4. С. 293–310. DOI: 10.31857/S0869607124040052.

11. Hu Y., Chen M., Pu J., Chen S., Li Y., Zhang H. Enhancing Phosphorus Source Apportionment in Watersheds through Species-Specific Analysis // Water Research. 2024. Vol. 253. Art. 121262. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121262.

12. Джабборов Н. И., Савельев А. П., Добриков А. В., Захаров А. М., Жуйков И. И. Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34. № 1. С. 101–114. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.101-114.

13. Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З., Минакова Д. А. Количественная оценка диффузной биогенной нагрузки, обусловленной воздействием сельского хозяйства, на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 57–69. DOI: 10.17076/lim2069.

14. Wu J., He S., Lu J. Multi-Scale Effects of Topography and Landscape Pattern on Riverine Nitrogen and Phosphorus Nutrients in an Agricultural Watershed // Landscape Ecology. 2025. Vol. 40. Art. 112. DOI: 10.1007/s10980-025-02131-y.

15. Chen G., Liu L., Wang W., Wang R., Li Y., Tang X., Li X. Effectiveness of Best Management Practices for Non-Point Source Pollution in Intensively Managed

Agricultural Watersheds // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 495. Art. 145076. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145076.

16. Li S., Xia B., Shen W., Lin Z., Huo K., Wei J. et al. Phosphorus Retention and Delivery Estimation Across a Large River Basin: Assessing the Impact of Landscape Patterns // Water Resources Research. 2025. Vol. 61. Art. e2024WR039347. DOI: 10.1029/2024WR039347.

17. Yang X., Han H., Yan X., Xie Y., Ren Y., Zhang Y., Yang D., She D., Huang X., Xia Y. Divergent Controls on Nitrogen and Phosphorus Export Regimes across Chinese Catchments // Water Research. 2026. Vol. 307. Art. 126674. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126674.

References

1. Yasinskii S. V., Kashutina E. A., Sidorova M. V. Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob"ektov ravninnykh territorii: problemy otsenki // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87. № 1. S. 115–130. DOI: 10.31857/S258755662301017X.

2. Sun H., Tian Y., Li L., Zhuang Y., Zhou X., Zhang H., Zhan W., Zuo W., Luan C., Huang K. Unraveling Spatial Patterns and Source Attribution of Nutrient Transport: Towards Optimal Best Management Practices in Complex River Basin // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 906. Art. 167686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167686.

3. Polyanin V. O., Fashchevskaya T. B., Slovyagina A. N. Osobennosti formirovaniya i regulirovaniya diffuznogo zagryazneniya v predelakh gorodskikh territorii (na primere r. Yauzy) // Vodnye resursy. 2023. T. 50. № 1. S. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

4. Wallington K., Cai X. Updating SWAT+ to Clarify Understanding of In-Stream Phosphorus Retention and Remobilization: SWAT+P.R&R // Water Resources Research. 2023. Vol. 59. No. 3. Art. e2022WR033283. DOI: 10.1029/2022WR033283.

5. Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Alent'ev Yu. Yu. Transgranichnyi vodoobmen v basseine Dona // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2023. T. 87. № 2. S. 250–

263. DOI: 10.31857/S2587556623020048.

6. Salim Aoubid H., Opp C. Nitrogen and Phosphorus Discharge Loads Assessment Using the SWAT Model: A Case Study of the Shatt Al-Arab River Basin // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 14. Art. 8376. DOI: 10.3390/app13148376.

7. Yasinskii S. V., Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Kashutina E. A., Rasulova A. M. Assessment of Nutrient Load on the Cheboksary Reservoir Using the Results of Modeling Runoff and Removal of Biogenic Elements from the Pilot Catchments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 3. P. 130–141. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130.

8. Ji K., Li W., Hao X., Ouyang W., Zhang Y. Transport Dynamics of Watershed Discharged Diffuse Phosphorus Pollution Load to the Lake in Middle of Yangtze River Basin // Environmental Pollution. 2024. Vol. 344. Art. 123221. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123221.

9. Kondrat'ev S. A., Bryukhanov A. Yu., Shmakova M. V., Rasulova A. M., Galakhina N. E., Zobkov M. B., Vasil'ev E. V., Oblomkova N. S. Otsenka vozmozhnykh izmenenii biogennoi nagruzki na Onezhskoe ozero pod vozdeistviem antropogennykh i klimaticheskikh faktorov // Vodnye resursy. 2024. T. 51. № 3. S. 285–296. DOI: 10.31857/S0321059624030056.

10. Galakhina N. E., Sabylina A. V., Zobkov M. B. Sovremennaya rechnaya biogennaya nagruzka na Onezhskoe ozero // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2024. T. 156. № 4. S. 293–310. DOI: 10.31857/S0869607124040052.

11. Hu Y., Chen M., Pu J., Chen S., Li Y., Zhang H. Enhancing Phosphorus Source Apportionment in Watersheds through Species-Specific Analysis // Water Research. 2024. Vol. 253. Art. 121262. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121262.

12. Dzhabborov N. I., Savel'ev A. P., Dobrikov A. V., Zakharov A. M., Zhuikov I. I. Modelirovanie i prognozirovanie vynosa biogennykh elementov s sel'skokhozyaistvennykh ugodii v zavisimosti ot agrofizicheskikh svoistv pochvy // Inzhenernye tekhnologii i sistemy. 2024. T. 34. № 1. S. 101–114. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.101-114.

13. Minakova E. A., Shlychkov A. P., Kondrat'ev S. A., Latypova V. Z., Minakova D. A. Kolichestvennaya otsenka diffuznoi biogennoi nagruzki, obuslovlennoi vozdeistviem sel'skogo khozyaistva, na vodosborakh Kuibyshevskogo i Nizhnekamskogo vodokhranilishch v granitsakh Respubliki Tatarstan // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2025. № 6. S. 57–69. DOI: 10.17076/lim2069.
14. Wu J., He S., Lu J. Multi-Scale Effects of Topography and Landscape Pattern on Riverine Nitrogen and Phosphorus Nutrients in an Agricultural Watershed // Landscape Ecology. 2025. Vol. 40. Art. 112. DOI: 10.1007/s10980-025-02131-y.
15. Chen G., Liu L., Wang W., Wang R., Li Y., Tang X., Li X. Effectiveness of Best Management Practices for Non-Point Source Pollution in Intensively Managed Agricultural Watersheds // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 495. Art. 145076. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145076.
16. Li S., Xia B., Shen W., Lin Z., Huo K., Wei J. et al. Phosphorus Retention and Delivery Estimation Across a Large River Basin: Assessing the Impact of Landscape Patterns // Water Resources Research. 2025. Vol. 61. Art. e2024WR039347. DOI: 10.1029/2024WR039347.
17. Yang X., Han H., Yan X., Xie Y., Ren Y., Zhang Y., Yang D., She D., Huang X., Xia Y. Divergent Controls on Nitrogen and Phosphorus Export Regimes across Chinese Catchments // Water Research. 2026. Vol. 307. Art. 126674. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126674.

Статья поступила в редакцию 21.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 21.07.2026; approved after peer review 25.08.2026; accepted for publication 12.10.2026.