

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 502/504; 556.512; 556.53

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ФОНОВОГО СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В РЕЧНЫХ ВОДАХ
В СТЕПНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНАХ РУССКОЙ РАВНИНЫ**

© 2024 г. С.В. Долгов*, Н.И. Коронкевич*, В.О. Швыдкий**,
Ю.Ю. Алентьев*, Е.В. Штамм***

**Институт географии РАН*

Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4. E-mail: koronkevich@igras.ru

***Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН*

Россия, 119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4. E-mail: svdolgov1978@yandex.ru

****Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН*

Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4.

Поступила в редакцию 31.03.2024. После доработки 01.04.2024. Принята к публикации 10.04.2024.

Обосновано использование фоновых показателей для контроля содержания биогенных веществ в поверхностных и подземных водах в степной и лесостепной зонах Русской равнины. Предложены подходы к определению фонового содержания биогенных веществ. Выявлены особенности формирования стока биогенных элементов в период половодья, летне-осенний и осенне-зимний периоды. Полученные результаты целесообразно использовать для оценки антропогенных изменений содержания аммонийного азота, азота нитратов и нитритов, минерального фосфора в поверхностных и грунтовых водах, а также в сточных водах. Показано, что нормативы содержания нитратов и аммонийного азота в речных и сточных водах целесообразно скорректировать с учетом уровня регионального природно-антропогенного фона.

Ключевые слова: Русская равнина, лесостепь и степь, речные бассейны, поверхностные и подземные воды, содержание азота и фосфора.

DOI: 10.24412/1993-3916-2024-3-140-146

EDN: ZDLQDN

Лимитирующим фактором использования водных ресурсов в лесостепной и степной зоне Русской равнины, испытывающих интенсивную антропогенную нагрузку, является не только небольшое их количество, но и невысокое качество. Нередко оно обусловлено повышенным содержанием в речных водах биогенных веществ, в том числе соединений азота и фосфора, способствующего развитию эвтрофирования и другим негативным процессам. Генезис гидроэкологической ситуации, зачастую негативной (несмотря на уменьшение в последние годы сброса сточных вод и загрязняющих веществ в их составе), остается в значительной мере неизвестным, что осложняет разработку эффективных водоохраных мер.

За исключением поверхностного склонового стока, главным образом весеннего (Хрисанов, Осипов, 1993; Ясинский, Гуров, 2006; Кондратьев и др., 2018), миграция биогенных веществ с другими элементами водного баланса обычно не анализируется, априори полагая, что вклад их незначительный. Однако за последние десятилетия произошли весьма существенные изменения в структуре водного баланса – значительно сократился поверхностный склоновый сток, но возросла инфильтрация талых и дождевых вод в почво-грунты зоны аэрации (Долгов и др., 2020). В изменившихся за последние десятилетия климатических условиях акцентирование внимания лишь на периоде весеннего половодья может приводить к существенному недоучету выноса биогенов в водные объекты с их водосборов.

Цель исследования заключается в оценке сезонного фонового содержания биогенных веществ в речных водах в лесостепи и степи Русской равнины с учетом генетической их неоднородности и сравнение его с нормативными показателями.

Материалы и методы

В основу методологии данного исследования положены представления о полиструктуре водного баланса (Коронкевич, 1990), высотно-пространственной гидрологической структуре равнинной территории (Долгов, Коронкевич, 2010), элементы которой по-разному трансформируют осадки в сток и по-разному изменяют их химический состав. Используемый комплексный гидролого-гидрохимический подход ориентирует на учет генетической неоднородности водного и химического стока, обусловленной особенностями формирования его поверхностной и подземной составляющих, а также влиянием природно-климатических и антропогенных факторов. Предлагаемый подход реализован путем определения и сравнения природно-антропогенных фоновых величин содержания биогенов для ряда элементов водного баланса. При этом полностью исключить влияние антропогенных факторов не представляется возможным, поскольку рассматриваемая территория в значительной мере распаханна и подвержена проведению различных агролесомелиоративных мероприятий. Вместе с тем при анализе исключены участки рек, в которые сбрасываются промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды и которые находятся в зоне влияния городских агломераций. Таким образом, для исследования использованы те участки, которые расположены среди типичных для лесостепной и степной зон агроландшафтов.

Под условным природно-антропогенным фоновым содержанием биогенных веществ в речных водах приняты его значения, соответствующие 50, 75 и 95% обеспеченности (вероятности превышения). Они определялись по пространственным кривым обеспеченности, построенных при обобщении результатов химических анализов для определенной фазы водного режима рек изучаемой территории. При других одинаковых условиях с наименьшими ошибками рассчитывается величина 50% обеспеченности. Она принята нами в качестве основной.

Различные аспекты оценки фоновых значений гидрохимических показателей в основном на локальном уровне рассмотрены в немногочисленных публикациях (Методические основы ..., 1981; Никаноров и др., 2007; Закруткин и др., 2004). Чаще всего определяется влияние на качество речных вод населенных пунктов, отдельных предприятий промышленности, сельского и водного хозяйства путем сопоставления гидрохимических данных в нижнем створе по отношению к верхнему фоновому (контрольному), расположенному вне пределов влияния изучаемых объектов. На возможность такой оценки, главным образом относительно влияния крупных населенных пунктов, и ориентирована сеть гидрохимических наблюдений Росгидромета. Однако она недостаточно репрезентативная для региональной гидроэкологической оценки, поскольку не проводятся наблюдения на многих малых и средних реках, испытывающих наиболее широко распространенную сельскохозяйственную нагрузку, в результате которой загрязненных вод образуется больше, чем подлежит учету водохозяйственной статистикой (Коронкевич и др., 2023).

Недостающая информация Росгидромета компенсировалась результатами полевых работ, выполненных при реализации проекта Российского научного фонда в 2020-2022 гг. (руководитель – А.Г. Георгиади) на участках рек, как указано выше, не подверженных влиянию сточных вод с урбанизированных территорий. Анализируемые показатели, такие как концентрация в воде аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, химического потребления кислорода (ХПК), определены в Институте биохимической физики РАН на основе фотометрического метода. В качестве предельно допустимых концентраций (ПДК) принято: для аммонийного азота – 0.4 мг N-NH₄⁺/л, азота нитритов – 0.02 мг N-NO₂⁻/л, азота нитратов – 9.1 мг N-NO₃⁻/л, фосфора фосфатов – 0.2 мг P-PO₄³⁻/л, ХПК для питьевого водоснабжения – 15 мг О/л. Для каждого из перечисленных показателей были построены кривые обеспеченности (вероятности превышения). В качестве примера на рисунке 1 приведена кривая обеспеченности концентрации фосфора в речных водах в зимнюю межень.

Кривые обеспеченности построены: для снежного покрова по 12 образцам, для речных вод в половодье – по 13 образцам, для летне-осенней межени – по 58 пробам, для зимней межени – по 38 пробам, для подземных вод – по 46 пробам, для стекающих со склонов поверхностных вод – по 19.

Результаты и обсуждение

Фоновые значения концентрации биогенных веществ в речных водах в лесостепи и степи в разные фазы водности. Результаты ориентировочной оценки фоновых величин анализируемых показателей для лесостепных и степных рек приведены на рисунке 2 (в единицах ПДК – отношении фоновой величины данного показателя к его ПДК).

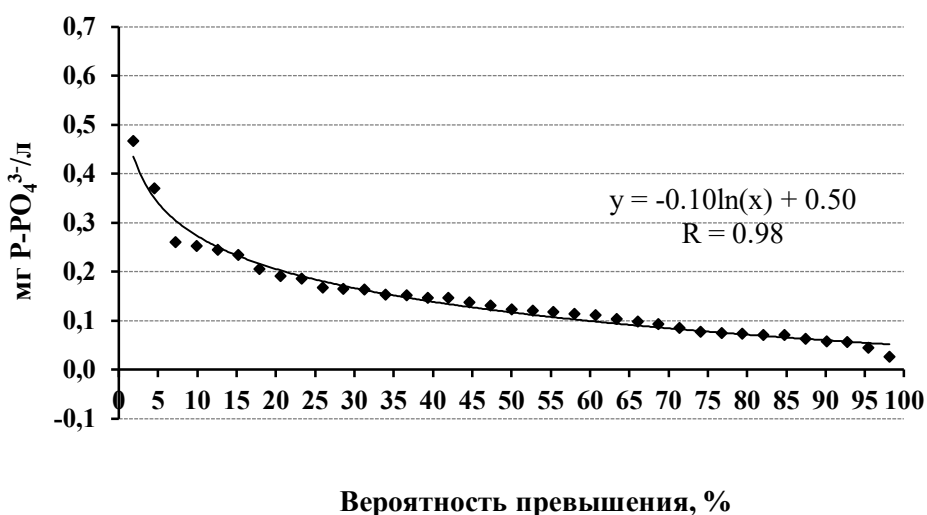


Рис. 1. Эмпирическая кривая вероятности превышения содержания минерального фосфора в реках лесостепной зоны в зимнюю межень 2021-2022 гг. Условные обозначения: R – коэффициент корреляции.

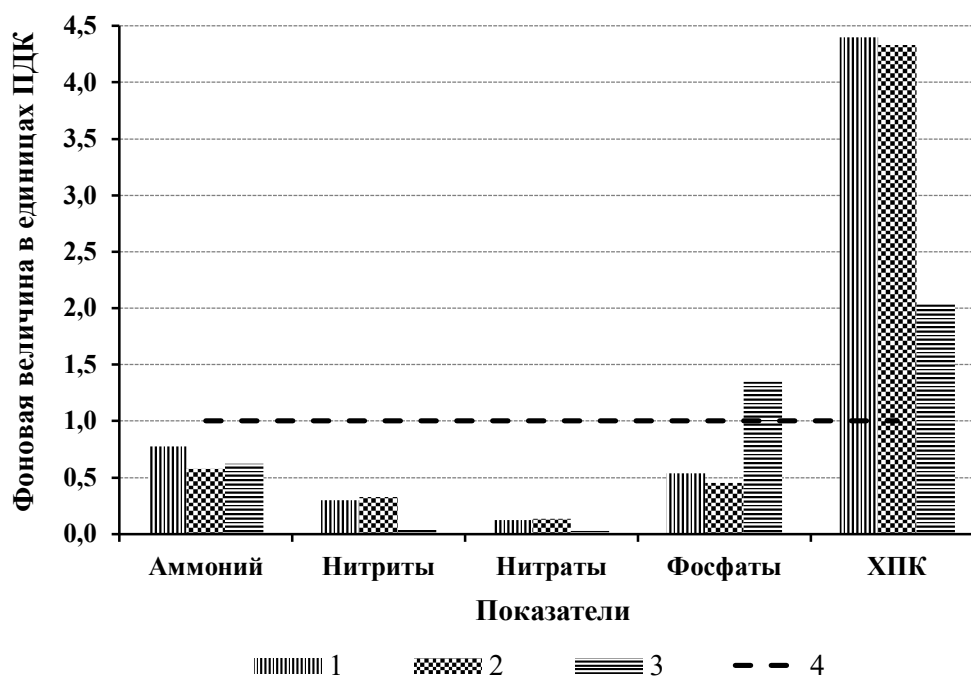


Рис. 2. Фоновые гидрохимические показатели речных вод в лесостепи и степи в разные фазы водности. Условные обозначения: 1 – зимняя межень, 2 – половодье, 3 – летне-осенняя межень, 4 – ПДК.

Расчеты показали следующее.

1. Региональные фоновые значения гидрохимических показателей существенно изменяются в зависимости от фазы водного режима. Наибольшая фоновая величина минерального азота отмечается в зимнюю межень и весной во время половодья: 50% обеспеченности – соответственно, 1,50 и 1,45 мг/л, 75% обеспеченности – 1,10 и 0,55 мг/л. В летне-осеннюю межень (вероятно, вследствие потребления водной растительностью) снижается более чем в 2 раза: 50% обеспеченности – 0,62 мг/л, 75% – 0,35 мг/л. Фоновая величина минерального фосфора P-PO₄³⁻ 50% обеспеченности составила в зимнюю межень 0,107 мг/л, в половодье – 0,090 мг/л, в летнюю межень – 0,270 мг/л; фоновая величина 75% обеспеченности – соответственно, 0,073, 0,070 и 0,195 мг/л.

2. Используемые в настоящее время величины ПДК по отдельным гидрохимическим показателям могут значительно превышать региональные фоновые значения, в т.ч. 50% обеспеченности. Для аммония это превышение в разные сезоны составило 1.3-1.7 раз, для нитритов – более 3 раз, достигая максимума для нитратов – более 8 раз. В связи с этим целесообразна корректировка используемых в настоящее время в гидроэкологических исследованиях показателей допустимой величины содержания различных форм минерального азота – в сторону их снижения, особенно в отношении нитратов. Правда, для такой корректировки целесообразна более детальная оценка региональных фоновых величин, в т.ч. на основе предложенных нами методических подходов.

3. В отличие от других рассмотренных показателей региональная фоновая величина ХПК интегрального показателя содержания в воде органических веществ, напротив, существенно больше ПДК – в 4-4.5 раза в зимнюю межень и в 2 раза в половодье. Наибольшие фоновые значения ХПК 50% обеспеченности отмечаются для зимней межени и весеннего половодья и составляют, соответственно, 66 и 65 мг О/л, снижаясь в летнюю межень более чем в 2 раза – до 30 мг О/л.

Особенностей формирования стока биогенных веществ в период половодья. Несмотря на значительное сокращение в последние десятилетия стока половодья (Долгов и др., 2020) оно остается весьма важной в гидроэкологическом отношении фазой водного и гидрохимического режима рек. Из сопоставления фоновых значений биогенов в речных водах в половодье с их содержанием в снежном покрове, в поверхностном и подземном стоке с речных водосборов следует нижеуказанное (рис. 3).

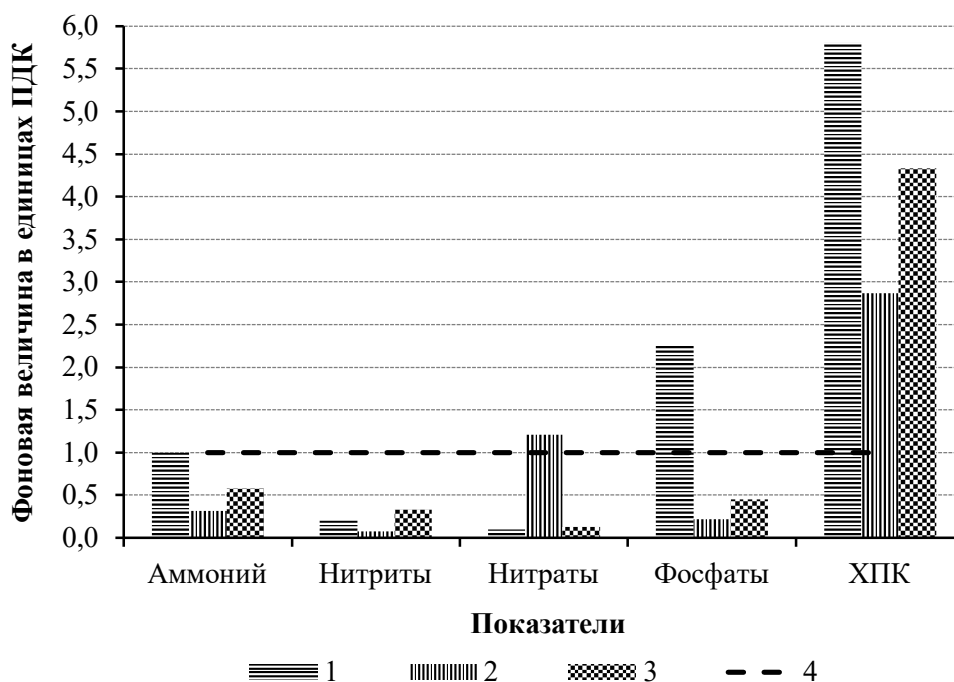


Рис. 3. Фоновые гидрохимические показатели для речного стока, поверхностного и подземного стока с водосборов в половодье (по данным за 2020–2022 гг.). Условные обозначения: 1 – поверхностный сток с водосборов, 2 – подземный сток с водосборов, 3 – речной сток в половодье, 4 – ПДК.

1. В миграции в речную сеть минерального азота в растворенном виде заметную роль играют атмосферные осадки. Перед началом весеннего половодья фоновая концентрация (50% обеспеченности) минерального азота в снеге составляет 0.93 мг/л. На следующей стадии формирования речного стока в стекающих по поверхности водосборов водах содержание азота возрастает примерно на 30% и достигает 1.20 мг/л.

2. Весьма важную роль в поступлении азота в реки играет подземный сток, особенно в последние десятилетия вследствие значительного сокращения весеннего поверхностного склонового стока. В дренируемых речной сетью грунтовых водах лесостепи и степи фоновая концентрация

минерального азота (50% обеспеченности) существенно выше, чем в других элементах водного баланса, и составляет 11 мг/л. В основном минеральный азот в грунтовых водах накапливается в форме нитратов, обладающих высокой миграционной способностью. Региональная фоновая величина содержания нитратов в дренируемых реками подземных водах даже превышает ПДК в 1.2 раза.

3. В отличие от минерального азота основную роль в поступлении в реки фосфора играет поверхностный сток с их водосборов. Фоновая величина 50% обеспеченности концентрации минерального фосфора в этом элементе водного баланса составляет 0.45 мг/л и по сравнению с другими его элементами в наибольшей степени превышает ПДК в 2.3 раза.

4. Региональная фоновая величина интегрального показателя содержания в воде органических веществ (ХПК) для всех рассмотренных воднобалансовых элементов существенно больше ПДК – в 2-6 раз. Наибольшие фоновые значения ХПК отмечаются для весеннего поверхностного стока с водосборов (87 мгО/л), речного стока в зимнюю межень и во время прохождения половодья (66 и 65 мгО/л соответственно).

Рассчитанные величины фоновых гидрохимических показателей носят ориентировочный характер и в дальнейшем при получении более детальной информации о пространственно-временной изменчивости миграции биогенов могут корректироваться. Тем не менее, полученные на данном этапе результаты могут использоваться для выявления негативных гидроэкологических ситуаций и поиска путей улучшения экологического состояния речных вод.

Оценка содержания биогенных веществ в речных водах на основе региональных фоновых величин гидрохимических показателей. Географо-гидрологический анализ результатов полевых работ, выполненных в период летней межени в 2020-2022 гг., в ходе которых было отобрано 79 проб воды, позволил выявить участки рек с наиболее высоким содержанием биогенных веществ, более чем в 2-3 раза превышающим фон.

Наиболее высокое содержание минерального азота зафиксировано в р. Сейм у пос. Прямыцыно – в 8 раз больше региональной фоновой величины 50% обеспеченности, в р. Усмань у г. Усмань – 4 раза, р. Перевозинка в г. Новоаннинском – 5 раз, в истоке и верховьях р. Дон – 3-12 раз и р. Сейм у пос. Карла Либкнехта – 3 раза. Наибольшее превышение фоновой концентрации минерального фосфора зафиксировано в р. Усмань в Воронежском заповеднике – 7-8 раз и у г. Усмань – 3.5 раза, р. Осередь в г. Бутурлиновка – 4 раза, в верховьях р. Дон у г. Донской – 4 раза, р. Сейм у пос. Прямыцыно и пос. Карла Либкнехта – 3 и 2.2 раза. На многих перечисленных участках рек наблюдается также превышение фоновой величины показателем ХПК до 2 раз и более.

Чаще всего аномально высокое превышение фоновых величин содержания биогенных веществ в речных водах изучаемой территории обусловлено хозяйственной деятельностью (прежде всего – сбросом сточных вод), реже – природными факторами (например, в истоках рек вследствие повышенной концентрации биогенов в выходящих на дневную поверхность грунтовых водах). Причина негативной гидроэкологической ситуации в Воронежском заповеднике, проявляющейся, в частности, в аномально высоком содержании биогенных веществ в р. Усмань, заключается не только в сбросе сточных вод в г. Усмань, но и в гидрохимическом влиянии лесной растительности – постоянного источника их поступления в грунтовые воды и далее в речную сеть. В не испытывающих существенной антропогенной нагрузки и протекающих по территории заповедника реках Ивнице и Лесной также зафиксировано превышение фоновых величин концентрации биогенов (по аммонийному азоту – в 3 раза, минеральному азоту – 1.3-1.5 раза) и показателю ХПК – в 2-3 раза.

Оценка эффективности очистки сточных вод на основе природно-антропогенного фона. Региональный природно-антропогенный фон целесообразно учитывать не только при оценке экологического состояния речных вод, но и для решения ряда других задач, в т.ч. для определения предельно допустимого содержания загрязняющих веществ в сточных водах. Ориентация при этом лишь на ПДК представляется недостаточно обоснованной.

Так, без учета природно-антропогенного фона можно прийти к сомнительному выводу, что сточные воды, например, Белгородской, Курской и Воронежской областей, не загрязняют нитратами речные воды. Однако региональное фоновое содержание нитратов в реках значительно ниже ПДК (рис. 4). Поэтому в данном случае целесообразно ужесточить нормативы в сторону снижения концентрации нитратов в сточных водах до фонового регионального уровня.

Подобная ситуация, хотя и выраженная не в столь явном виде, наблюдается и в отношении аммонийного азота, фоновое содержание которого изменяется в течение года от 0.6 до 0.8 ПДК (рис. 2).

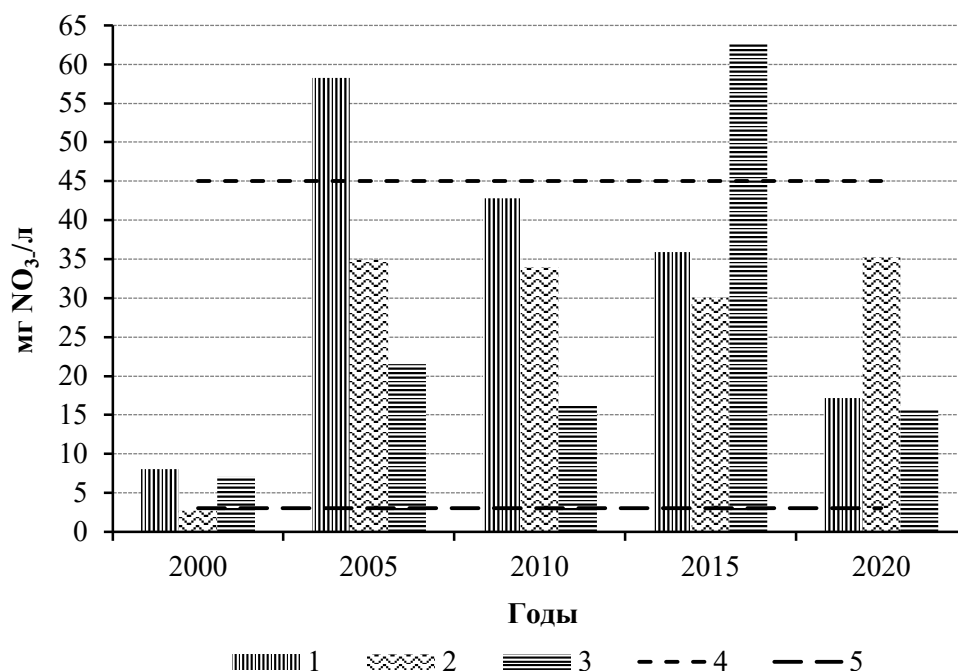


Рис. 4. Динамика содержания нитратов в загрязненных сточных водах (Автоматизированная ..., 2024). Условные обозначения: 1 – Белгородская область, 2 – Воронежская область, 3 – Курская область, 4 – ПДК, 5 – региональный фон.

Выводы

Рассчитанные величины фоновых гидрохимических показателей носят ориентировочный характер и в дальнейшем при получении более детальной информации о пространственно-временной изменчивости миграции биогенов могут корректироваться. Тем не менее, полученные уже на данном этапе результаты целесообразно использовать для оценки экологического состояния речных вод, вклада антропогенной нагрузки в процессы его формирования, выявления негативных гидроэкологических ситуаций, разработки эффективных природо- и водоохранных мероприятий.

Для определения предельно допустимого содержания загрязняющих веществ в сточных водах представляется недостаточно обоснованной ориентация лишь на ПДК. Так, фоновое содержание нитратов и аммонийного азота в реках лесостепной и степной зон существенно меньше ПДК. Поэтому целесообразно ужесточить нормативы в сторону снижения их концентрации в сточных водах до фонового регионального уровня. С учетом фоновых величин становится возможной корректировка и других гидрохимических показателей.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) 2024-2028 гг. «Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). 2024 [Электронный ресурс <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 08.03.2024)].
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И. 2010. Гидрологическая ярусность равнинной территории // Известия РАН. Серия географическая. № 1. С. 7-25.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барбанова Е.А. 2020. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона

// Водные ресурсы. Т.47. № 6. С. 674-685.

Закруткин В.Е., Коронкевич Н.И., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В. 2004. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России (в пределах Ростовской области). Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета. 252 с.

Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Терехов А.В. 2018. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) // Вопросы географии. Сб. 145. Гидрологические изменения. М.: Кодекс. С. 89-108.

Коронкевич Н.И. 1990. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука. 205 с.

Коронкевич Н.И., Черногаева Г.М., Долгов С.В., Каишутин Е.А., Барабанова Е.А., Лукьянов К.В. 2023. Антропогенно-измененные воды, поступающие в водные объекты в бассейне Дона // Метеорология и гидрология. № 6. С. 74-82.

Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод. 1981 / Ред. А.В. Караушев. Л.: Гидрометеиздат. 175 с.

Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Черногаева Г.М. 2007. Антропогенно-измененный природный фон и его формирование в пресноводных экосистемах России // Метеорология и гидрология. № 11. С. 62-79.

Хрисанов Н.И., Оситов Г.К. 1993. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат. 279 с.

Ясинский С.В., Гуров Ф.Н. 2006. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Водное хозяйство России. № 2. С. 41-71.