

Водные биоресурсы и среда обитания
2024, том 7, номер 4, с. 54–67
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2024, vol. 7, no. 4, pp. 54–67
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 556.114:546.18+504.45.058(282.247.36)
https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_54
EDN: PCZQXK



Для цитирования: Сорокина В.В., Клещенков А.В., Герасюк В.С., Лихтанская Н.В., Кулыгин В.В., Гуртовая Т.Ю., Жулидов А.В., Лю Маодянь, Бердников С.В. Многолетняя динамика концентрации фосфора и оценка эвтрофирования нижнего течения реки Дон. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2024. Т. 7, № 4: 54–67. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_54.

For citation: Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Gerasyuk V.S., Likhtanskaya N.V., Kulygin V.V., Gurtovaya T.Yu., Zhulidov A.V., Liu Maodian, Berdnikov S.V. Long-term dynamics of phosphorus concentration and assessment of eutrophication in the lower reaches of the Don River. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2024. Vol. 7, no. 4: 54–67. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_54. (In Russian).

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ФОСФОРА И ОЦЕНКА ЭВТРОФИРОВАНИЯ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ДОН

В. В. Сорокина^{1*}, А. В. Клещенков¹, В. С. Герасюк¹, Н. В. Лихтанская¹,
В. В. Кулыгин¹, Т. Ю. Гуртовая¹, А. В. Жулидов¹, Маодянь Лю², С. В. Бердников¹

¹Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), г. Ростов-на-Дону 344006, Россия

²Пекинский университет, Пекин 100871, Китай

*E-mail: v.sorok@mail.ru

Аннотация

Введение. Избыточное поступление биогенных веществ в поверхностные воды представляет экологическую проблему. В конце XX – начале XXI вв. биогенная нагрузка на реки снизилась благодаря деятельности, связанной с управлением водными ресурсами (очистке сточных вод, запретам на использование фосфатных моющих средств, сокращению использования некоторых сельскохозяйственных удобрений и пр.). **Актуальность.** Достоверные данные об уровнях содержания фосфора в воде и их многолетней динамике в поверхностных водах немногочисленны, в т. ч. из-за проблем с качеством таких данных. По-прежнему мало информации о том, как изменилось трофическое состояние нижнего Дона. **Цель** работы — провести сравнительный анализ долгосрочных (1986–2002 и 2011–2020 гг.) тенденций изменения уровней содержания минерального и общего фосфора в нижнем течении р. Дон и оценить связанные с этим изменения в вероятности формирования тех или иных трофических условий. **Методы.** Исследование выполнено на основе данных анализа содержания фосфатов и общего фосфора в воде в замыкающем створе р. Дон (ст. Раздорская) в 1986–2002 и 2011–2020 гг., а также результатов статистического моделирования методом WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (взвешенные регрессии по времени, расходу воды и сезону)). **Результаты.** Установлены основные тенденции изменения динамики содержания фосфатов и общего фосфора в воде

нижнего Дона. Для концентрации фосфатов и общего фосфора наблюдается отрицательная зависимость от расходов воды. Начиная с 1995 г. отмечается тенденция уменьшения относительной доли минеральной и увеличения органической составляющей в общем фосфоре. В соответствии с уровнями общего фосфора в воде определен трофический статус нижнего Дона в период 1986–2020 гг. Состояние нижнего Дона изменилось от мезотрофного в 1990-х гг. до эвтрофного в первой декаде XXI в. Во второй декаде XXI в. положительный тренд изменения уровней содержания фосфора в речной воде сменился на отрицательный, а в 2015 г. эвтрофные условия поменялись на мезотрофные. **Выводы.** Механизмы, ответственные за долгосрочные изменения уровней содержания фосфора в воде нижнего Дона, остаются неустановленными и могут быть уточнены в результате дальнейших исследований. По нашему мнению, наблюдаемые многолетние вариации содержания фосфора в реке связаны с резкими изменениями в сельском хозяйстве, промышленности и других видах экономической деятельности в регионе после 1991 г. Изменение гидрологического режима (маловодье) также внесло свой вклад, повлияв на качественные характеристики стока биогенных элементов и их соотношение.

Ключевые слова: минеральный фосфор, общий фосфор, речной сток, река Дон, трофические условия

LONG-TERM DYNAMICS OF PHOSPHORUS CONCENTRATION AND ASSESSMENT OF EUTROPHICATION IN THE LOWER REACHES OF THE DON RIVER

V. V. Sorokina^{1*}, A. V. Kleshchenkov¹, V. S. Gerasyuk¹, N. V. Likhtanskaya¹,
V. V. Kulygin¹, T. Yu. Gurtovaya¹, A. V. Zhulidov¹, Maodian Liu², S. V. Berdnikov¹

¹*Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Rostov-on-Don 344006, Russia*

²*Peking University, Beijing 100871, China*

*E-mail: v.sorok@mail.ru

Abstract

Background. Excessive input of biogenic substances into surface waters poses an environmental problem. In the late 20th – early 21st centuries, biogenic load to rivers decreased due to activities related to water resource management (wastewater treatment, ban on the use of phosphate detergents, reduction in the use of some agricultural fertilizers, etc.). **Relevance.** Reliable data on phosphorus levels in water and their long-term dynamics in surface waters are scarce, mainly due to data quality issues. There is still little information on how the trophic status of the lower Don River has changed. The *aim* of this work is to conduct the comparative analysis of long-term (1986–2002 and 2011–2020) trends in changes of mineral and total phosphorus levels in the lower reaches of the Don River and to assess the related change in the probabilities of development of certain trophic conditions. **Methods.** This study has been carried out based on the data obtained through the analysis of phosphate and total phosphorus content in water in the outlet section of the Don River (stanitsa Razdorskaya) in 1986–2002 and 2011–2020 and the further statistical modeling using the WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season) method. **Results.** Major trends in variation of the levels of phosphates and total phosphorus have been identified. The concentration of phosphates and total phosphorus shows negative dependence on water discharge. Since 1995, there has been a decreasing trend in the relative share of the mineral phosphorus component in total phosphorus and an increasing trend for the organic component. Based on the levels of total phosphorus in the water, the trophic status of the lower Don River has been defined for the period 1986–2020. The status of the lower Don River changed from mesotrophic in the 1990s to eutrophic in the first decade of the 21st century. In the second decade of the 21st century, a positive trend in phosphorus levels in the river water changed to a negative one, and in 2015, the eutrophic conditions shifted to mesotrophic. **Conclusion.** The mechanisms responsible for the observed long-term changes in phosphorus levels in the lower reaches of the Don River remain unclear and may be clarified by further studies. We believe that the observed long-term variations in phosphorus levels in the river water are related to drastic changes that have been occurring in agriculture, industry, and other economic activities since 1991. Changes in the hydrological regime (low river flow) have also contributed by affecting the qualitative characteristics of the runoff of biogenic elements and their ratios.

Keywords: mineral phosphorus, total phosphorus, river runoff, Don River, trophic conditions

ВВЕДЕНИЕ

Чрезмерное поступление биогенных элементов — азота и фосфора — в пресноводные и морские экосистемы было и остается одной из самых серьезных проблем для окружающей среды во многих странах мира [1–5]. По данным Комиссии Европейского Совета, несмотря на сокращение с середины 1980-х гг. применения удобрений в сельском хозяйстве, поступление биогенных элементов в поверхностные воды в странах Европейского Союза (ЕС) (и в соседних государствах, включая Российскую Федерацию (РФ)) представляет экологическую проблему (цит. по [6]), и эта ситуация в целом кардинально не изменилась до настоящего времени.

Антропогенная нагрузка является доминирующим фактором формирования речного выноса фосфора, что подтверждается наличием прямой зависимости между концентрациями минерального и общего фосфора с одной стороны, и плотностью населения — с другой [7].

По данным Агентства по охране окружающей среды США (цит. по [6]), основными источниками поступления биогенных элементов в поверхностные воды являются: использование удобрений в сельском хозяйстве; поверхностный смыл с пахотных земель атмосферными осадками; стоки и отходы с животноводческих ферм и пастбищ, с селитебных территорий, с очистных сооружений. Исследования, проведенные в полувлажных регионах США (т. е. в условиях, аналогичных таковым на территории Ростовской области), показали, что на вынос биогенных элементов в поверхностные воды влияли ливневые стоки, мелиорация почв, процессы взаимодействия поверхностных и грунтовых вод, а также длительность и технологические особенности применения удобрений в регионе [8].

Дон — одна из крупнейших рек европейской части РФ. После Цимлянского водохранилища водосбор нижнего Дона практически полностью расположен в Ростовской области.

Регион представляет собой экономически важную территорию с интенсивным сельским хозяйством и большим количеством потенциальных источников загрязнения поверхностных вод биогенными соединениями. Ежегодный сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты в Ростовской области составляет примерно 200 млн м³, что соответствует 16-му месту среди регионов России [9–12].

Достоверные данные об уровнях содержания биогенных элементов в воде и их многолетней динамике в поверхностных водах бывшего СССР и РФ немногочисленны, в т. ч. из-за проблем с качеством данных [13–18].

В соответствии с 6-й Рамочной программой ЕС по развитию научных исследований и технологий (раздел «Глобальные изменения и экосистемы») с 2006 по 2011 г. на нижнем Дону международным консорциумом (23 партнера из 17 стран) реализовывался мультидисциплинарный проект SCENES «Водные сценарии для Европы и сопредельных государств» (Water Scenarios for Europe and Neighbouring States, SCENES). Разрабатывались всеобъемлющие сценарии (до 2025 г.) состояния пресноводных ресурсов в Европе и в сопредельных государствах на основе ретроспективного анализа имеющейся информации, концептуального моделирования, определения перспектив развития (цит. по [6]). Нижний Дон был одной из пилотных территорий исследования многолетней изменчивости качества воды — ключевой проблемы для густонаселенного региона, испытывающего хронический дефицит питьевой воды [19, 20].

Результаты исследований в рамках проекта SCENES показали, что изменения в биогенной нагрузке относятся к ключевым факторам, которые следует учитывать в долгосрочном планировании управления качеством воды на территории нижнего Дона. По данным за 1986–2002 гг. зафиксирована тенденция роста содержания минерального и общего фосфора в замыкающем створе р. Дон, что теоретически могло иметь серьезные последствия для качества воды в регионе [6].

Южный научный центр РАН с 2011 г. по настоящее время ведет системные наблюдения на участке от устья Дона до нижнего бьефа Цимлянской плотины, в боковых притоках и в Цимлянском водохранилище.

Целью работы являются сравнительный анализ долгосрочных (1986–2002 и 2011–2020 гг.) тенденций изменения уровней содержания минерального и общего фосфора ($P-PO_4^{3-}$; $P_{\text{общ}}$) в нижнем течении р. Дон и оценка обусловленных этими изменениями трофических условий.

В данном исследовании мы показываем, что тенденция роста содержания $P-PO_4^{3-}$ и $P_{\text{общ}}$ в воде нижнего Дона сменилась после 2011 г. на противоположную, а после 2015 г. трофический статус реки изменился с эвтрофного на мезотрофный.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Местом отбора проб воды выбран район «закрывающего створа» в станице Раздорской (рис. 1). Это ближайший к устью реки пункт наблюдений, который не подвержен ветровому влиянию морской воды и лежит выше по течению от основного потенциального источника промышленного и коммунального загрязнения — г. Ростова-на-Дону. При этом он находится ниже по течению от устья р. Северский Донец, дренирующей обширные территории юга Восточно-Европейской равнины. Бассейн нижнего Дона густонаселен, на берегах реки расположены многочисленные промышленные и сельскохозяйственные предприятия, деятельность которых отрицательно влияет на качество воды в реке. Тем не менее, по сравнению с районами интенсивного сельского хозяйства, территория вокруг станицы Раздорской практически нетронута в этом отношении.

Суточные данные по стоку воды в замыкающем створе Дона получены из Гидрологических ежегодников Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ, а также из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [21].

Отбор проб воды для определения концентраций биогенных элементов проводили с января по декабрь в периоды 1986–2002 и 2011–2020 гг.

Воду отбирали с поверхности (0–0,5 м) в центре русла реки и вблизи (1–2 м) обоих берегов, после чего собранные пробы сливали вместе для последующего анализа усредненной пробы на содержание $P-PO_4^{3-}$ и $P_{\text{общ}}$. В период с 1986 по 2002 г. отборы проб проводились ежемесячно, примерно 9–12 отборов за каждый сезон, а в период с 2011 по 2020 г. отбор проб не был регулярным в пределах каждого года. Периодически проводился внутренний и внешний контроль качества анализов.

Фосфаты определяли фотометрически после реакции с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой. Предел обнаружения $P-PO_4^{3-}$ составлял 0,003–0,005 мг Р/дм³ (по Методическим указаниям РД 52.24.382-95). Предел количественного измерения (минимально определяемая концентрация фосфатов) составлял 0,010 мг Р/дм³, как указано в более позднем руководстве (РД 52.24.382-2006).

Общий фосфор также измеряли фотометрически после окисления персульфатом. Предел обнаружения $P_{\text{общ}}$ составлял 0,01 мг Р/дм³ (по Методическим указаниям РД 52.24.387-95). Предел количественного измерения (минимально определяемая концентрация) общего фосфора составлял 0,020 мг Р/дм³, как указано в более позднем руководстве (РД 52.24.387-2006).

Чтобы заполнить пробелы в значениях концентраций и потоков фосфатов и общего фосфора, в



Рис. 1. Карта-схема нижнего Дона с указанием места отбора проб в станице Раздорской

Fig. 1. Outline map of the lower reaches of the Don River with location of the sampling site at stanitsa Razdorskaya

программном комплексе Exploration and Graphics for RivEr Trends (исследование и графическое отображение речных трендов) [22] выполнено статистическое моделирование методом WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (взвешенные регрессии по времени, расходу воды и сезону)), который ранее уже был применен для оценки твердого стока р. Дон [23, 24].

Использованный инструментарий в настоящее время позиционируется как наиболее точный [23]. Метод WRTDS базируется на том факте, что соотношение между концентрацией рассматриваемого вещества и расходом воды не постоянно для всего изучаемого периода. Поэтому строится не одно регрессионное уравнение (на основе всех имеющихся данных за исследуемый период), а несколько (по числу узлов расчетной сетки) с индивидуальным набором коэффициентов, определяемых на основе наиболее «близких» по времени, расходу воды и сезону измерений концентрации. При этом каждое «близкое» значение получает свой «вес», который вычисляется на основе трех показателей (по времени, расходу воды и сезону) между точкой оценки и точкой данных. Оценки концентрации для каждого дня изучаемого периода рассчитывались посредством билинейной интерполяции оценок концентрации в узлах расчетной сетки. Таким образом, создается гибкое статистическое представление ожидаемых значений концентрации рассматриваемого вещества.

На основе данных о концентрациях $P-PO_4^{3-}$ и $P_{\text{общ}}$ за период 1986–2020 гг. построены две статистические модели, которые продемонстрировали заслуживающие доверие результаты. Коэффициенты детерминации R^2 для каждой из моделей составили 0,6. Значения рекомендованной авторами метода характеристики качества модели — статистики смещения потока — составили 0,008 и 0,005 для фосфатов и общего фосфора, соответственно. Оба значения указывают на приемлемый уровень потенциальной систематической ошибки в расчетных значениях потоков фосфатов и общего фосфора и означают, что погрешность в оценках их долгосрочных средних, вероятно, будет меньше 1 %.

После оценки методом WRTDS среднесуточных значений фосфатов и общего фосфора рассчитаны их средние за год концентрации с оценками 90%-ного доверительного интервала. Эти величи-

ны и рассматривались при анализе многолетней изменчивости как концентраций минерального и общего фосфора, так и их стока с речными водами.

Оценка трофического состояния речных экосистем

В то время как система классификации трофических состояний для озер относительно хорошо разработана, попытки разработать аналогичную систему классификации трофических состояний для рек оказались менее успешными [25]. Наиболее перспективной считается классификация рек по диапазону уровней содержания биогенных элементов в воде [26]. Авторы работы G.M. Carr и J.P. Neary [27], обобщив имеющуюся информацию (по 406 станциям отбора проб) по биогенным элементам в реках, размещенную в Глобальной базе данных ЮНЕП по мониторингу качества поверхностных вод мира (UNEP GEMS/Water Programme, GEMStat) [28], и взяв за основу уровни содержания общего фосфора в речных водах, предложили считать концентрацию 0,07 мг общего фосфора/дм³ границей для олиготрофных/мезотрофных экосистем и концентрацию 0,20 мг общего фосфора/дм³ границей для мезотрофных/эвтрофных состояний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годовой речной сток

Годовой сток Дона в 1986–2002 гг. изменялся от 16,1 км³ (1992 г.) до максимума 35,6 км³ в 1994 г. (таблица). Сток в нижнем течении Дона регулируется сбросом воды через плотину Цимлянского водохранилища, расположенную примерно в 135 км выше по течению от станицы Раздорской, и в значительной степени находится под влиянием экономических требований для жилищно-коммунального хозяйства, энергетики, судоходства и поливного земледелия [19] (Правила использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища, 2016).

В 2007 г. начался очередной маловодный период, который продолжается по настоящее время. Весной 2018 г. наблюдалось интенсивное весеннее половодье и годовой сток превысил 23 км³, но средний за период 2007–2020 гг. годовой сток — 15,2 км³ — лишь немногим превышает сток предшествующего периода маловодья в 1970-х гг. [21, 29].

В текущий период маловодья на Дону уменьшился сток весеннего половодья и увеличилось

Межгодовая изменчивость водного стока, стока фосфатов ($P-PO_4^{3-}$) и общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), доли $P-PO_4^{3-}$ в $P_{\text{общ}}$ в р. Дон

Inter-annual variability of water runoff, phosphates ($P-PO_4$) and total phosphorus (P_{total}) runoff, and $P-PO_4^{3-}/P_{\text{total}}$ ratio in the Don River

Год Year	Водный сток, км ³ /год Water runoff, km ³ /year	$P_{\text{общ}}$, тыс. т/год P_{total} , ths. t/year	$P-PO_4^{3-}$, тыс. т/год $P-PO_4^{3-}$, ths. t/year	Доля $P-PO_4^{3-}$ в $P_{\text{общ}}$, % $P-PO_4^{3-}/P_{\text{total}}$ ratio, %
1986	23,8	0,99	0,66	67
1987	19,3	1,08	0,72	67
1988	20,9	1,45	0,99	69
1989	16,2	1,27	0,94	73
1990	16,3	1,45	1,12	77
1991	22,9	2,10	1,61	79
1992	16,1	1,71	1,37	80
1993	20,4	2,23	1,79	82
1994	35,7	3,17	2,53	83
1995	20,9	2,38	1,99	84
1996	26,3	3,13	2,52	84
1997	20,1	2,76	2,26	82
1998	21,4	3,12	2,41	79
1999	23,1	3,57	2,74	77
2000	21,5	3,53	2,77	79
2001	20,4	3,67	2,83	77
2002	18,9	3,78	2,69	71
2011	13,0	3,08	2,02	65
2012	16,2	3,72	2,36	62
2013	15,6	3,52	2,14	61
2014	14,5	3,15	1,84	59
2015	11,2	2,26	1,24	54
2016	12,7	2,46	1,35	55
2017	14,8	2,83	1,51	53
2018	23,5	4,54	2,47	53
2019	16,1	2,83	1,44	51
2020	10,3	1,71	0,78	46
1986–2002 гг.				
Среднее Average value	21,4	2,43	1,88	77
Максимальное Maximum	35,7	3,78	2,83	84
Минимальное Minimum	16,1	0,99	0,66	67
2011–2020 гг.				
Среднее Average value	14,8	3,01	1,72	56
Максимальное Maximum	23,5	4,54	2,47	65
Минимальное Minimum	10,3	1,71	0,78	46

подземное питание рек, вызванное общим ростом увлажнения Восточно-Европейской равнины [30]. Эти процессы связаны с изменением циркуляции атмосферы, увеличением числа оттепелей и снижением глубины промерзания почвы, что способствует пополнению запасов грунтовых вод в зимний период. Отмечается также сокращение водопотребления практически по всем категориям водопользователей, но наиболее существенно (в 4 раза) уменьшилось сельскохозяйственное водоснабжение [30].

Многолетняя изменчивость содержания фосфатов и общего фосфора в районе замыкающего створа реки Дон

В течение периода с 1986 по 2002 г. уровни содержания фосфатов и общего фосфора в нижнем Дону непрерывно увеличивались во все сезоны [6]. Общая положительная тенденция изменения уровней фосфора была нарушена только в 1994 г., который характеризовался относительно более высокими расходами воды. Концентрации фосфора были самыми низкими весной и находились в диапазоне от 0,02 до 0,18 мг Р/дм³ для Р_{общ} и от

0,02 до 0,09 мг Р/дм³ для Р-Р_{О₄³⁻}. Содержание фосфатов достигало максимума (0,16 мг Р/дм³) зимой 2002 г., в то время как общий фосфор был самым высоким (0,20 мг Р/дм³) летом и зимой 2002 г. [6].

Для сравнения отметим, что в 250 реках США в 1975–1994 гг. уровни содержания Р-Р_{О₄³⁻} и Р_{общ} [25] составляли 0,05 и 0,12 мг Р/дм³, соответственно, что сопоставимо с концентрациями фосфатов и общего фосфора в нижнем Дону в 1988–1990 гг. (рис. 2). Однако в дальнейшем, из-за прогрессивного роста содержания фосфора в воде нижнего Дона, уровни содержания этих соединений превысили упомянутые выше средние значения (включая 75-й процентиль концентрации 0,10 мг Р/дм³) к 2002 г. [6].

В 2011–2020 гг. характерная для предыдущего исследуемого периода положительная тенденция изменения уровней содержания фосфатов и общего фосфора в речной воде сменилась на отрицательную (рис. 2). Обращает на себя внимание тот факт, что при положительной тенденции измене-

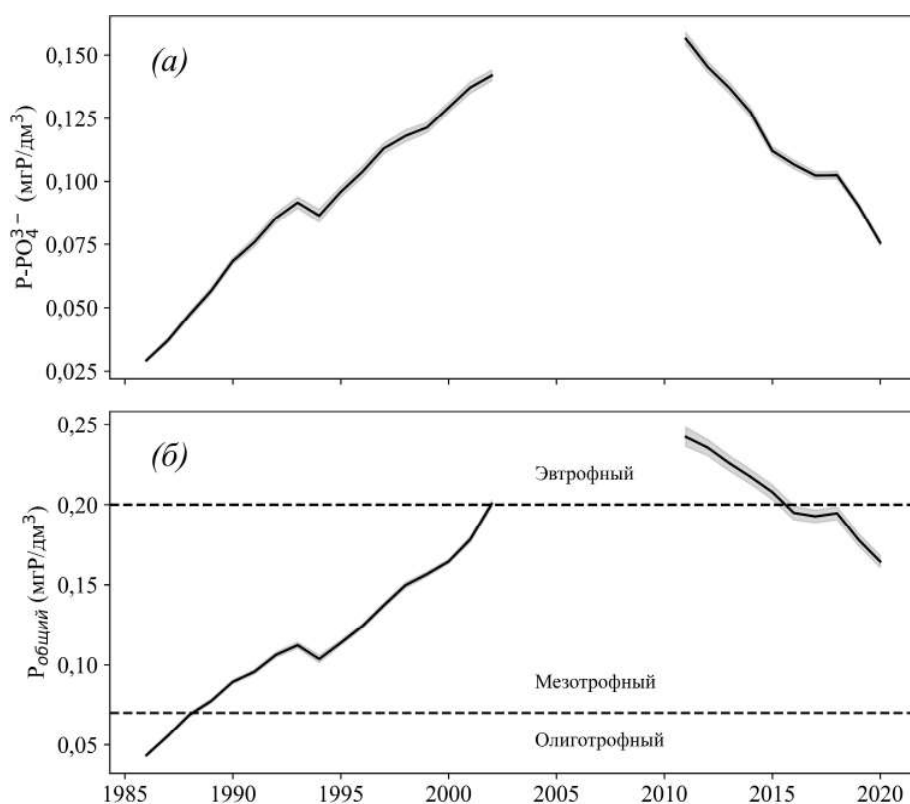


Рис. 2. Межгодовая изменчивость концентрации фосфатов Р-Р_{О₄³⁻} (а) и общего фосфора Р_{общ} (б) (мг Р/дм³) в р. Дон. Серая заливка — 90%-ный доверительный интервал среднегодового значения концентрации

Fig. 2. Inter-annual variability of phosphates Р-Р_{О₄³⁻} concentration (а) and total phosphorus Р_{total} concentration (б) (mg Р/dm³) in the Don River. Grey shading indicates 90 % confidence interval for the average annual concentration

ния уровней содержания фосфора в 1986–2002 гг. в год с максимальным расходом воды и объемом водного стока (1994 г.) концентрации фосфатов и общего фосфора резко снизились по сравнению с предыдущим и последующим годами. Однако при отрицательной тенденции изменения уровней содержания фосфора в 2011–2020 гг. в год с максимальным расходом воды и объемом водного стока (2018 г.) концентрации $P-PO_4^{3-}$ и $P_{\text{общ}}$ повысились по сравнению с предыдущим и последующим годами (рис. 2).

В целом, для концентрации фосфатов и общего фосфора на нижнем Дону наблюдается отрицательная зависимость от расходов воды (рис. 3), однако статистически значимой она является только для общего фосфора (для коэффициента линейного тренда $r_{\text{value}}=0,01$) (рис. 3б).

Объемы годового стока фосфатов и общего фосфора, как было отмечено ранее [15], зависят главным образом от объемов водного стока, и их относительно повышенные значения характер-

ны для многолетних лет (таблица). Несмотря на существенные колебания от года к году, среднее, максимальное и минимальное значения стока общего фосфора за период 2011–2020 гг. превышают таковые за 1986–2002 гг. Максимальный сток $P_{\text{общ}}$ отмечен в 2018 г. Средний и максимальный сток фосфатов, в отличие от общего фосфора, в последний маловодный период меньше, чем в 1986–2002 гг. Это обстоятельство можно связать с уменьшением доли минерального фосфора в составе $P_{\text{общ}}$, в среднем с 77 % в первом рассматриваемом периоде до 56 % во втором периоде. Начиная с 1995 г. отмечена тенденция снижения относительной доли минеральной и увеличения органической составляющей общего фосфора.

Трофическое состояние нижнего Дона в районе замыкающего створа, оцененное исходя из предложенной классификации [26, 27], изменилось от олиготрофного в 1980-х гг. до мезотрофного, вплотную приблизившись к эвтрофным условиям в 2002 г. (рис. 2б). Результаты наблюдений в 2011–2014 гг.

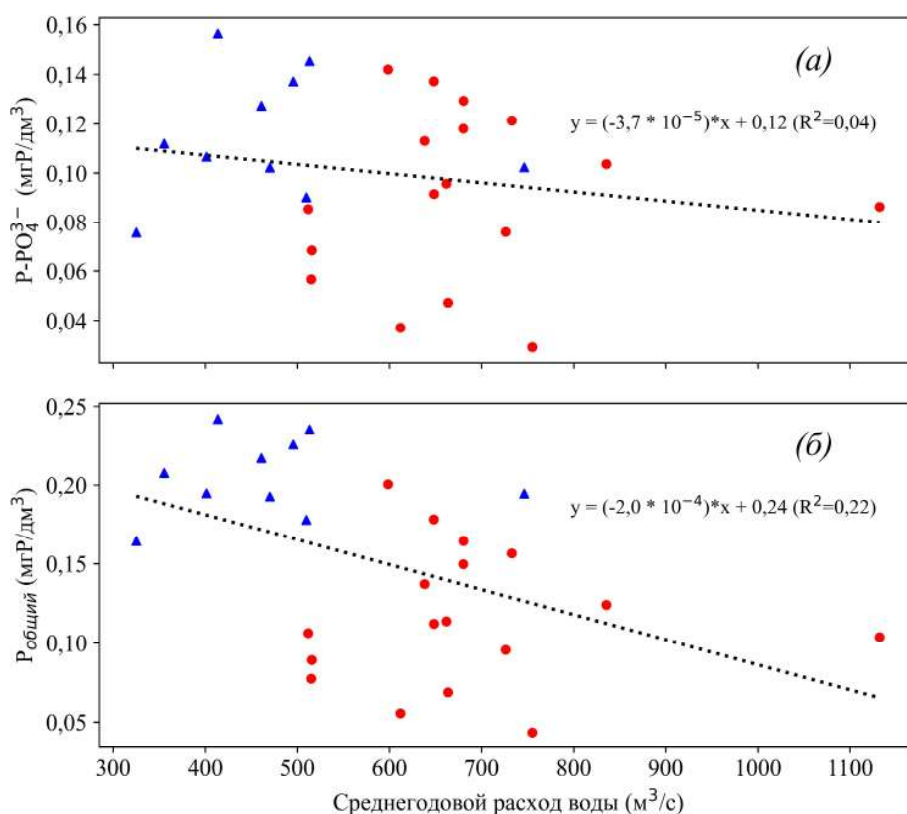


Рис. 3. Диаграммы рассеяния среднегодовых значений расхода воды (m^3/c) и концентрации $P-PO_4^{3-}$ (а), концентрации $P_{\text{общ}}$ (б) ($mg P/dm^3$) в р. Дон. Красные круги — данные периода 1986–2002 гг., синие треугольники — данные периода 2011–2020 гг.

Fig. 3. Scatter diagrams of the average annual values of water discharge (m^3/s), concentrations of $P-PO_4^{3-}$ (а), and concentrations of P_{total} (б) ($mg P/dm^3$) in the Don River. Red circles indicate the data for the period 1986–2002, and blue triangles indicate the data for the period 2011–2020

показывают, что трофическое состояние р. Дон в этот период уже можно охарактеризовать как эвтрофное. Такие изменения скорее всего произошли в период с 2003 по 2010 г. Это предположение требует дополнительных данных, которыми мы не располагаем. После 2011 г. концентрация общего фосфора в речных водах стала уменьшаться, и в 2015 г. трофическое состояние р. Дон изменилось с эвтрофного на мезотрофное (рис. 2б).

Несмотря на установленную тенденцию снижения концентраций фосфора в воде нижнего Дона в период 2011–2020 гг., ситуация с биогенной нагрузкой в современных условиях маловодья остается серьезной. Река может демонстрировать характеристики эвтрофной системы (например, «цветение воды» из-за развития водорослей или, что более важно, развития цианобактерий, фиксирующих азот из атмосферы при лимитировании роста фитопланктона азотом [6]). При реализации проекта SCENES изменения в нагрузке биогенов и эвтрофировании были определены как влияющие на пять из семи основных типов водопользования в бассейне нижнего Дона [6].

В ряде работ отмечается, что «в последние десятилетия в бассейне Дона, как и на всей территории Русской равнины, вследствие потепления климата произошли кардинальные изменения в формировании водного и водно-биогенного баланса. Они не имеют аналогов за весь период инструментальных наблюдений» [31]. Произошла существенная трансформация использования ландшафтов водосборной площади Дона, обусловленная расширением урбанизированных территорий, а также уменьшением площадей под зяблевой (осенней) пахотой. Такие изменения землепользования должны были способствовать увеличению поверхностного склонового стока, но из-за вклада климатических факторов возобладала другая тенденция — его снижение вплоть до нуля в отдельные годы [31]. Для бассейна Дона вклад климатического фактора в современное общее изменение поверхностного склонового стока оценивается в 75–85 %, а вклад антропогенного фактора — лишь 15–25 % [32].

При уменьшении в современный период стока речного половодья доля поверхностного склонового стока, с учетом его «добегания» до рек и водоемов, снизилась почти в 4 раза в степной зоне, в то время как доля стока с площади гидрографической сети возросла в 1,7 раза. В степных

районах участие стока инфильтрационного происхождения (подземного плюс «верховодки») увеличилось в два с лишним раза. В результате вынос фосфора с диффузным стоком в 5 раз превышает его вынос со сточными водами [33]. При этом авторы статьи отмечают, что в крупные реки и водохранилища попадает лишь часть диффузного выноса биогенов, поскольку в малых реках и водоемах происходит процесс самоочищения.

В бассейне Дона из общего среднего ежегодного выноса фосфора в весенний период (1,9 тыс. т фосфора (4,5 кг/км²)) на поверхностный сток с незалесенных склонов приходится немногим более 20 %, на долю стока, формируемого на площади гидрографической сети, — около 60 % и стока инфильтрационного происхождения — примерно 20 %. Современный вынос биогенных веществ с урбанизированных площадей в холодный период года оценивается примерно в 1,5–2 раза ниже, чем вынос с поверхностным склоновым стоком. В теплый период года вынос биогенных веществ с урбанизированных площадей возрастает в 2,5–3 раза по сравнению с периодом половодья [34].

Механизмы, ответственные за наблюдаемые долгосрочные изменения в уровнях содержания фосфатов и общего фосфора в воде нижнего Дона, пока остаются неустановленными из-за большого количества возможных источников поступления фосфора и сложности биогеохимических процессов, связанных с региональной гидрологией и землепользованием, но могут быть уточнены в результате дальнейших исследований. Изучение потенциальных источников и путей миграции биогенных элементов для учета их изменений в нижнем течении реки Дон потребует разработки обширной исследовательской программы, включающей не только низовья Дона, но и прилегающие территории (поскольку 90 % воды нижнего Дона поступает с территорий, находящихся за пределами Ростовской области).

Хотя в настоящее время невозможно продемонстрировать прямую связь между динамикой использования удобрений и уровнями содержания фосфора в речной воде, все же можно предположить, что наблюдаемые долгосрочные тенденции в содержании фосфора в воде связаны с резкими изменениями, произошедшими в сельском хозяйстве, промышленности и других видах деятельности местного населения после 1991 г. Вариации климата и гидрологического режима (маловодье)

также внесли свой вклад, повлияв на качественные характеристики стока биогенных элементов и их соотношение, хотя абсолютное влияние изменения климата в значительной степени неизвестно.

ВЫВОДЫ

1. В период с 1986 по 2002 г. в воде нижнего Дона росли концентрации как минеральных, так и органических соединений фосфора, достигнув эвтрофного уровня по принятой в мире классификации трофического состояния речных вод.
2. По-видимому, трофическое состояние исследуемого участка нижнего течения р. Дон в период 2003–2010 гг. можно характеризовать как эвтрофное.
3. После 2011 г. концентрация общего фосфора в речных водах стала уменьшаться, и в 2015 г. трофическое состояние реки Дон изменилось с эвтрофного на мезотрофное.
4. Наблюдаемое в 2011–2020 гг. уменьшение среднегодовых концентраций минерального и общего фосфора в воде нижнего Дона снижает риск негативных экологических и социальных последствий («цветения» воды и ухудшения ее качества для населения) и может быть обусловлено существенной трансформацией землепользования в бассейне Дона и климатическими факторами, изменившими водный и биогенный сток с водосборных территорий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация подготовлена в рамках реализации Государственного задания ЮНЦ РАН, №№ гр. проектов 122011900153-9, 122103100027-3, 122013100131-9, а также при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (National Natural Science Foundation of China) (гранты № 42476127 и № 41821005)). Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)» № 501994.

ACKNOWLEDGMENTS

This publication is executed as part of the State Assignment of the Scientific Research Centre of the Russian Academy of Sciences, No. of projects 122011900153-9, 122103100027-3, 122013100131-9, and supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 42476127 and

No. 41821005). The work has been conducted using the equipment of the Shared Research Facility “Center of the Joint Use of Scientific and Technological Equipment of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (research, development, approbation)” No. 501994.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mei Z., Cheng P., Wang K., Wei Q., Barlow J., Wang D. A first step for the Yangtze. *Science*. 2020. Vol. 367 (6484): e1314. <https://doi.org/10.1126/science.abb5537>.
2. Alewell C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D.A., Panagos P., Borrelli P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, no. 1: e4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
3. Grizzetti B., Vigiak O., Udias A., Aloe A., Zanni M., Bouraoui F., Pistocchi A., Dorati C., Friedland R., De Roo A., Benitez Sanz C., Leip A., Bielza M. How EU policies could reduce nutrient pollution in European inland and coastal waters. *Global Environmental Change*. 2022. Vol. 69: e102281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102281>.
4. Nikolaidis N.P., Phillips G., Poikane S., Várbiro G., Bouraoui F., Malagó A., Lilli M.A. River and lake nutrient targets that support ecological status: European scale gap analysis and strategies for the implementation of the Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 813: e151898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151898>.
5. Vigiak O., Udias A., Grizzetti B., Zanni M., Aloe A., Weiss F., Hristov J., Bisselink B., De Roo A., Pistocchi A. Recent regional changes in nutrient fluxes of European surface waters. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 858, pt. 3: e160063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160063>.
6. Zhulidov A.V., Kämäri J., Robarts R.D., Pavlov D.F., Rekolainen S., Gurtovaya T.Yu., Meriläinen J.J., Lugovoy V.V. Long-term dynamics of waterborne nitrogen, phosphorus and suspended solids in the Lower Don River Basin (Russian Federation). *Journal of Water & Climate Change*. 2011. Vol. 2, no. 2–3: 201–211. <https://doi.org/10.2166/wcc.2011.030>.
7. Savenko V.S., Savenko A.V. The main features of phosphorus transport in world rivers. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 1: e16. <https://doi.org/10.3390/w14010016>.
8. Domagalski J.L., Ator S., Coupe R., McCarthy K., Lampe D., Sandstrom M., Baker N. Comparative study of transport processes of nitrogen, phosphorus, and herbicides to streams in five agricultural basins, USA. *Journal of Environmental Quality*. 2008. Vol. 37, issue 3: 1158–1169. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0408>.
9. Официальный портал правительства Ростовской области. 2024. URL: <https://www.donland.ru/> (дата обращения 10.01.2024).

10. База показателей по муниципальным образованиям Ростовской области. *Федеральная служба государственной статистики : официальный веб-сайт*. URL: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/munst60/DBInet.cgi> (дата обращения 10.01.2024).
11. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023. Статистический сборник / под ред. С.Н. Егоренко. М.: Изд-во Федеральной службы государственной статистики, 2023. 1126 с.
12. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2023. Статистический сборник / под ред. С.Н. Егоренко. М.: Изд-во Федеральной службы государственной статистики, 2023. 853 с.
13. Boeva L.V., Vinnikov Yu.Y., Zhulidov A.V., Volovik G.S., Khlobystov V.V., Brown S.R. An assessment of the validity of selected water quality data for the lower Don River. *GEMS/Water Reports*. 2000. 32 p.
14. Zhulidov A.V., Khlobystov V.V., Robarts R.D., Pavlov D.F. Critical analysis of water quality monitoring in the Russian Federation and former Soviet Union. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2000. Vol. 57, no 9: 1932–1939. <https://doi.org/10.1139/cjfas-57-9-1932>.
15. Сорокина В.В., Бердников С.В. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря. *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45, № 6: 670–684. <https://doi.org/10.1134/S0321059618060147>.
16. Сорокина В.В., Герасюк В.С. Вариации гидрохимических показателей в водном континууме Нижний Дон – Черное море. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 2018. Т. 1, № 3: 251–257. <https://doi.org/10.23885/2500-395x-2018-1-3-251-257>.
17. Косенко Ю.В. Основные аспекты баланса биогенных элементов в Азовском море. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 4: 24–37. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24.
18. Гидрохимический сток рек Европейской части России. Атлас / под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: Изд-во Института водных проблем Российской академии наук, 2020. 155 с.
19. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море: основы реконструкции. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
20. Решетняк О.С. Многолетняя изменчивость химического состава и качества воды в бассейне реки Дон. *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2023. Т. 8, № 1 (31): 52–60. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.87.88.005>.
21. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. 2014. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 10.09.2024).
22. Hirsch R.M., De Cicco L.A. User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and data-Retrieval: R packages for hydrologic data. *Techniques and methods 4-A10. Hydrologic analysis and interpretation. Section A. Statistical analysis*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Publ., 2015. 93 p. <https://doi.org/10.3133/tm4A10>.
23. Лихтанская Н.В., Бердников С.В. Использование программного комплекса EGRET для оценки потоков взвешенных веществ с речным стоком. *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 2022. Т. 1, № 7: 32–37. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37>.
24. Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенко А.В. Твердый сток реки Дон и поступление взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период маловодья. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Т. 23, № 5: ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023es000856>.
25. Alexander R.B., Smith R.A. Trends in the nutrient enrichment of U.S. rivers during the late 20th century and their relation to changes in probable stream trophic conditions. *Limnology and Oceanography*. 2006. Vol. 51, issue 1, pt. 2: 639–654. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0639.
26. Dodds W.K., Jones J.R., Welch E.B. Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Research*. 1998. Vol. 32, issue 5: 1455–1462. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00370-9).
27. Carr G.M., Neary J.P. Water quality for ecosystem and human health. 2nd ed. Burlington, Canada: UNEP GEMS/Water Programme Publ., 2008. 120 p.
28. GEMStat. The Global Freshwater Quality Database. URL: <http://www.gemstat.org/> (дата обращения 10.09.2024).
29. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V., Bulysheva N.I. Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem. *Journal of Sea Research*. 2023. Vol. 193: e102373. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102373>.
30. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
31. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Алентьев Ю.Ю. Трансграничный водообмен в бассейне Дона. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 2: 250–263. <https://doi.org/10.31857/S2587556623020048>.
32. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона. *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47, № 6: 674–685. <https://doi.org/10.31857/S032105962006005X>.

33. Коронкевич Н.И., Долгов С.В., Кашутина Е.А. Современный вынос биогенов в реки и водоемы с водосборных территорий в бассейне Дона. *Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы : матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 3–5 октября 2019 г.)*. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, Цифровая полиграфия, 2019. Т. 1: 425–428.
34. Коронкевич Н.И., Долгов С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В. Поверхностный склоновый сток и диффузный вынос биогенов в реки и водоемы южной части Русской равнины. *Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации : тезисы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 14–15 марта 2019 г.)*. СПб: Изд-во Российского государственного гидрометеорологического университета, 2019: 250–251.
8. Domagalski J.L., Ator S., Coupe R., McCarthy K., Lampe D., Sandstrom M., Baker N. Comparative study of transport processes of nitrogen, phosphorus, and herbicides to streams in five agricultural basins, USA. *Journal of Environmental Quality*. 2008. Vol. 37, issue 3: 1158–1169. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0408>.
9. Ofitsial'nyy portal pravitel'stva Rostovskoy oblasti [Official portal of the Government of the Rostov Region]. 2024. Available at: <https://www.donland.ru/> (accessed 10.01.2024). (In Russian).
10. Baza pokazateley po munitsipal'nym obrazovaniyam Rostovskoy oblasti [Database for various metrics across the municipal entities of the Rostov Region]. In: *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki : ofitsial'nyy veb-sayt [Federal State Statistics Service. Official website]*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/munst60/DBInet.cgi> (accessed 10.01.2024). (In Russian).
11. Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. 2023. Statisticheskiy sbornik [Regions of Russia. Social and economic indicators. 2023. Statistical compendium]. S.N. Egorenko (ed.). Moscow: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service] Publ., 2023. 1126 p. (In Russian).
12. Regiony Rossii. Osnovnye kharakteristiki sub"ektov Rossiyskoy Federatsii. 2023. Statisticheskiy sbornik [Regions of Russia. Main characteristics of the federal subjects of the Russian Federation. 2023. Statistical compendium]. S.N. Egorenko (ed.). Moscow: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service] Publ., 2023. 853 p. (In Russian).
13. Boeva L.V., Vinnikov Yu.Y., Zhulidov A.V., Volovik G.S., Khlobystov V.V., Brown S.R. An assessment of the validity of selected water quality data for the lower Don River. *GEMS/Water Reports*. 2000. 32 p.
14. Zhulidov A.V., Khlobystov V.V., Robarts R.D., Pavlov D.F. Critical analysis of water quality monitoring in the Russian Federation and former Soviet Union. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2000. Vol. 57, no 9: 1932–1939. <https://doi.org/10.1139/cjfas-57-9-1932>.
15. Sorokina V.V., Berdnikov S.V. Nutrient loading of the Don and Kuban on the ecosystem of the Sea of Azov. *Water Resources*. 2018. Vol. 45, no. 6: 920–934. <https://doi.org/10.1134/S0097807818060143>.
16. Sorokina V.V., Gerasyuk V.S. Variatsii gidrokhimicheskikh pokazateley v vodnom kontinuuime Nizhniy Don – Chernoe more [Variations of hydrochemical characteristics in the Lower Don – the Black Sea aquatic continuum]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem [Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems]*. 2018. Vol. 1, no. 3: 251–257. <https://doi.org/10.23885/2500-395x-2018-1-3-251-257>. (In Russian).

REFERENCES

1. Mei Z., Cheng P., Wang K., Wei Q., Barlow J., Wang D. A first step for the Yangtze. *Science*. 2020. Vol. 367 (6484): e1314. <https://doi.org/10.1126/science.abb5537>.
2. Alewell C., Ringeval B., Ballabio C., Robinson D.A., Panagos P., Borrelli P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, no. 1: e4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
3. Grizzetti B., Vigiak O., Udias A., Aloe A., Zanni M., Bouraoui F., Pistocchi A., Dorati C., Friedland R., De Roo A., Benitez Sanz C., Leip A., Bielza M. How EU policies could reduce nutrient pollution in European inland and coastal waters. *Global Environmental Change*. 2022. Vol. 69: e102281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102281>.
4. Nikolaidis N.P., Phillips G., Poikane S., Várbíró G., Bouraoui F., Malagó A., Lilli M.A. River and lake nutrient targets that support ecological status: European scale gap analysis and strategies for the implementation of the Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 813: e151898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151898>.
5. Vigiak O., Udías A., Grizzetti B., Zanni M., Aloe A., Weiss F., Hristov J., Bisselink B., De Roo A., Pistocchi A. Recent regional changes in nutrient fluxes of European surface waters. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 858, pt. 3: e160063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160063>.
6. Zhulidov A.V., Kämäri J., Robarts R.D., Pavlov D.F., Rekolainen S., Gurtovaya T.Yu., Meriläinen J.J., Lugovoy V.V. Long-term dynamics of waterborne nitrogen, phosphorus and suspended solids in the Lower Don River Basin (Russian Federation). *Journal of Water & Climate Change*. 2011. Vol. 2, no. 2–3: 201–211. <https://doi.org/10.2166/wcc.2011.030>.
7. Savenko V.S., Savenko A.V. The main features of phosphorus transport in world rivers. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 1: e16. <https://doi.org/10.3390/w14010016>.

17. Kosenko Yu.V. Osnovnye aspekty balansa biogen-nykh elementov v Azovskom more [Basic aspects of the biogenic elements balance in the Azov Sea]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*. 2019. Vol. 2, no. 4: 24–37. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24. (In Russian).
18. Gidrokhimicheskiy stok rek Evropeyskoy chasti Rossii. Atlas [Hydrochemical runoff of rivers in the European part of Russia. Atlas]. R.G. Dzhamalov, O.S. Reshetnyak, M.M. Trofimchuk (ed.). Moscow: Institut vodnykh problem Rossiyskoy akademii nauk [Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2020. 155 p. (In Russian).
19. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. Azovskoe more: osnovy rekonstruktsii [Sea of Azov: principles of reconstruction]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydro-meteorological Publishing House], 1985. 272 p. (In Russian).
20. Reshetnyak O.S. Mnogoletnyaya izmenchivost' khimicheskogo sostava i kachestva vody v bassejne reki Don [Long-term variability of chemical composition and water quality in the Don River Basin]. *Groznenskiy estestvennonauchnyy byulleten' [Grozny Natural Science Bulletin]*. 2023. Vol. 8, no. 1 (31): 52–60. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.87.88.005>. (In Russian).
21. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov [Automated information system for state monitoring of water bodies]. 2014. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed 10.09.2024). (In Russian).
22. Hirsch R.M., De Cicco L.A. User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and dataRetrieval: R packages for hydrologic data. In: *Techniques and methods 4-A10. Hydrologic analysis and interpretation. Section A. Statistical analysis*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Publ., 2015. 93 p. <https://doi.org/10.3133/tm4A10>.
23. Likhtanskaya N.V., Berdnikov S.V. Ispol'zovanie programmnoy kompleksa EGRET dlya otsenki potokov vzheshennykh veshchestv s rechnym stokom [EGRET software application to evaluation of suspended solids flows with river flow]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem [Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems]*. 2022. Vol. 1, no. 7: 32–37. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37>. (In Russian).
24. Likhtanskaya N.V., Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V. Tverdyy stok reki Don i postuplenie vzevi v del'tu pri nagonakh: statisticheskoe modelirovanie i sopostavlenie v period malovod'ya [Solid runoff of the Don River and suspended matter flow into the delta during surges: Statistical modeling and comparison in the low water period]. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23, no. 5: ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023es000856>. (In Russian).
25. Alexander R.B., Smith R.A. Trends in the nutrient enrichment of U.S. rivers during the late 20th century and their relation to changes in probable stream trophic conditions. *Limnology and Oceanography*. 2006. Vol. 51, issue 1, pt. 2: 639–654. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0639.
26. Dodds W.K., Jones J.R., Welch E.B. Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Research*. 1998. Vol. 32, issue 5: 1455–1462. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00370-9).
27. Carr G.M., Neary J.P. Water quality for ecosystem and human health. 2nd ed. Burlington, Canada: UNEP GEMS/Water Programme Publ., 2008. 120 p.
28. GEMStat. The Global Freshwater Quality Database. Available at: <http://www.gemstat.org/> (accessed 10.09.2024).
29. Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Kleshchenkov A.V., Tyutyunov Yu.V., Kulygin V.V., Kovaleva G.V., Bulysheva N.I. Marine indicators of climate change in the Azov Sea ecosystem. *Journal of Sea Research*. 2023. Vol. 193: e102373. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102373>.
30. Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. Vodnye resursy basseyna Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie [Water resources of the Don River Basin and their ecological status]. Moscow: GEOS Publishers, 2017. 205 p. (In Russian).
31. Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Alentyev Yu.Yu. Transgranichnyy vodoobmen v bassejne Dona [Transboundary water exchange in the Don River Basin]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series]*. 2023. Vol. 87, no. 2: 250–263. <https://doi.org/10.31857/S2587556623020048>. (In Russian).
32. Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-hydrological changes in the Don Basin. *Water Resources*. 2020. Vol. 47, no. 6: 934–944. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060056>.
33. Koronkevich N.I., Dolgov S.V., Kashutina E.A. Sovremennyy vynos biogenov v reki i vodoemy s vodosbornykh territoriy v bassejne Dona [Current runoff of biogenic substances into rivers and water bodies from the catchment areas in the Don River Basin]. In: *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Voronezh, 3–5 oktyabrya 2019 g.) [Global climate change: regional effects, models, forecasts. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Voronezh, 3–5 October, 2019)]*. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet [Voronezh State University] Publ., Tsifrovaya poligrafiya [Digital Printing], 2019. Vol. 1: 425–428. (In Russian).
34. Koronkevich N.I., Dolgov S.V., Kashutina E.A., Sidорова M.V. Poverkhnostnyy sklonovyy stok i diffuznyy vynos biogenov v reki i vodoemy yuzhnoy chasti

Russkoy ravniny [Slope runoff and diffuse pollution of rivers and reservoirs by nutrients in the southern part of the Russian Plain]. In: *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoychivogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii : tezisy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Sankt-Peterburg, 14–15 marta 2019 g.)* [Current problems of hydrometeorology and

sustainable development of the Russian Federation. Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Saint Petersburg, 14–15 March, 2019)]. Saint Petersburg: Rossiyskiy gosudarstvennyy gidrometeorologicheskiy universitet [Russian State Hydrometeorological University] Publ., 2019: 250–251. (In Russian).

Об авторах:

Сорокина Вера Владимировна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0002-3742-892X, v.sorok@mail.ru

Клещенков Алексей Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0002-7976-6951, kle-aleksej@yandex.ru

Герасюк Виктория Сергеевна, младший научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0003-0445-0044, gerasyuk.v@mail.ru

Лихтанская Наталия Викторовна, научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-8612-6808, natalikht@gmail.com

Кулыгин Валерий Валерьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-9748-6497, kulygin@sscra.ru

Гуртовая Татьяна Юрьевна, научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0001-9885-2102, tanya@cppis.ru

Жулидов Александр Васильевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0009-0003-4240-0520, al.zhulidov@mail.ru

Liu Maodian, Ph.D., Assistant Professor, Peking University (100871, Beijing, Yiheyuan Road, 5), ORCID 0000-0001-5059-0334, maodian.liu@pku.edu.cn

Бердников Сергей Владимирович, доктор географических наук, директор ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41), ORCID 0000-0002-3095-5532, berdnikovsv@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024

Поступила после рецензии 12.11.2024

Принята к публикации 14.11.2024

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 14.10.2024

Revised 12.11.2024

Accepted 14.11.2024

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.