

## Динамика содержания соединений азота и фосфора в Рыбинском водохранилище за многолетний период

И.Э. Степанова ✉

✉ iris@ibiw.ru

ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, Ярославская обл., пос. Борок

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Межгодовая динамика содержания биогенных элементов позволяет оценить степень трофии водоемов и масштабы их антропогенного эвтрофирования. Изучено содержание всех форм биогенных элементов в Рыбинском водохранилище в 1993–2018 гг. как в сезонном, так и во временном аспектах. В последние десятилетия отмечается тенденция увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора в водоеме. Статус водохранилища в целом оценивается как мезотрофный. **Методы.** Основные данные получены в 2001–2018 гг. в рамках регулярных экспедиционных исследований. Отбор проб производили на шести станциях. В пробах воды, дополнительно к главным формам биогенных элементов, анализировали содержание гидроксиламина, одного из важнейших промежуточных продуктов широкомасштабных биохимических процессов – нитрификации, денитрификации, азотфиксации, методом Стрикленда–Парсонса, модифицированным в лаборатории. **Результаты.** В вегетационный период в Рыбинском водохранилище концентрация гидроксиламина на всех станциях и во все сезоны не превышала 6 мкг N/л. В Шекснинском плесе отмечены большие количества нитратов, особенно в районе выпуска сточных вод в устье р. Кошта. Верхнюю часть этого плеса можно отнести к эвтрофным. В Рыбинском водохранилище наблюдается значительное снижение концентрации неорганических форм азота и фосфора летом и в начале осени и их повышение в зимний и весенний периоды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** нитраты, нитриты, ионы аммония, общий фосфор, общий азот, Рыбинское водохранилище, природные воды.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования по теме АААА–А18–118012690123–4.

**Для цитирования:** Степанова И.Э. Динамика содержания соединений азота и фосфора в Рыбинском водохранилище за многолетний период // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 69–81. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-69-81.

Дата поступления 08.08.2023.

### DYNAMICS OF THE NITROGEN AND PHOSPHOROUS CONTENT IN THE RYBINSK RESERVOIR OVER THE MANY-YEAR PERIOD

Irina E. Stepanova ✉

✉ iris@ibiw.ru

Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Water Biology; Borok, Nekous Rayon, Yaroslav Oblast, Russia

### ABSTRACT

**Relevance.** Annual dynamics of the biogenic elements content enables to assess the degree of the water bodies' trophic state and the scale of their anthropogenic eutrophication. We

© Степанова И.Э., 2024

have researched content of all biogenic elements' forms in the Rybinsk Reservoir in 1993–2018 both in seasonal and temporal aspects. Over the past decades we have registered the trend to increase of phosphates and total phosphorous concentration in the water body. We estimated the reservoir status as mesa/trophic. **Methods.** The main data were obtained in 2001–2018 within the frameworks of regular expedition researches. Six station were involved in sampling. In the samples, in addition to the main forms of biogenic materials, we analyzed content of hydroxylamine, one of the most prominent intermediate product of the large-scale bio/chemical processes that is nitrification, de-nitrification, and nitrogen fixation with the Strickland-Parsons method modified in our laboratory. **Results.** During the vegetation period in the Rybinsk Reservoir the hydroxylamine concentration did not exceed 6 mg N/l at all stations and during all seasons. At the Sheksninsk reach, we found increased quantities of nitrates, particularly near the wastewater discharge point in the Koshta River mouth. The upstream part of this reach can be identified as a eutrophic one. In the Rybinsk Reservoir we observed considerable decrease of the nitrogen and phosphorous non-organic forms in the summer time and in the beginning of the fall and their increase during the winter and spring periods.

**Keywords:** nitrates, nitrites, ammonium ions, total phosphorous, total nitrogen, Rybinsk Reservoir, natural waters.

**Financing:** The work has been done within the frameworks of the State Assignment of Ministry of Science and Higher Education according the theme AAAA–A18–118012690123–4.

**For citation:** Stepanova I.E. Dynamics of the nitrogen and phosphorous content in the Rybinsk Reservoir over the many-year period. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 69–81. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-69-81.

Received 08.08.2023.

## ВВЕДЕНИЕ

Соединения азота и фосфора необычайно важны для функционирования водных экосистем. Их состояние, как среды обитания гидробионтов, во многом определяется содержанием биогенных элементов, которые часто лимитируют продукцию фитопланктона и высшей водной растительности [1, 2, 3]. Знание сезонных и межгодовых вариаций содержания биогенных элементов необходимо также для оценки степени трофии водоемов и прогноза изменений масштабов их антропогенного эвтрофирования. Поэтому наблюдения за их режимом в Рыбинском водохранилище начались еще до его заполнения в реках, впоследствии его образовавших.

Источниками поступления соединений азота и фосфора в водоем является сток через Шекснинский и Угличский гидроузлы, поступление из донных отложений, в результате абразивных процессов, с атмосферными осадками, подземными и сточными водами. Из анализа полученных данных за весь период существования Рыбинского водохранилища следует, что использование различных методов анализа, несистематическое получение и отрывочность аналитических данных, их недостаточность для общей характеристики этого сложного водного объекта, дают противоречивые результаты. Так, до заполнения водохранилища количество неорганических форм биогенных элементов было достаточно велико в реках, которые его образовали, – Волге, Мологе и Шексне: нитраты достигали 0,8

мг/л в весенний период, фосфаты – 0,16 мг/л. Летом нитриты и нитраты исчезали полностью, аммонийный азот и фосфаты значительно снижались [4]. Зимой концентрации неорганических форм биогенных элементов были высокими: количество нитратов доходило до 0,5 мг/л.

При сравнении концентраций этих веществ в реках до заполнения водохранилища и в 1943–1946 гг. отмечалась тенденция к снижению количества нитратного и повышению аммонийного азота в Волжском плесе [5]. Отмечено, что летом концентрация нитратов падала до аналитического нуля (на станции Молога в 1947 г. [6]). При этом концентрация фосфатов оставалась высокой даже в период наиболее активной вегетации водорослей. Исходя из этого, было высказано предположение, что в водохранилище развитие фитопланктона лимитируется соединениями азота. Позднее к аналогичному выводу пришли и некоторые другие исследователи, измерявшие содержание неорганических форм биогенных элементов в 1950-е годы [7, 8]. Исследования, проведенные в 1965 г., показали, что в Главном плесе, представляющем основную водную массу водохранилища, содержание аммонийного и нитратного азота в летний период в среднем составляло 0,07 и 0,13 мгN/л [2]. При этом концентрация фосфатов снижалась до аналитического нуля. Крайне низкие концентрации фосфатов были характерны и для остальной части водохранилища. Отсюда следовал вывод о лимитировании первичной продукции соединениями фосфора, а не азота. Контролирующая роль фосфора в развитии фитопланктона сохранялась и в 1989 г. [9]. Эти выводы противоречат предыдущим исследованиям. Данные по сезонной динамике азот и фосфорсодержащих соединений также имеют некоторые различия. Причины столь существенной несогласованности результатов не могут быть объяснены изменениями, произошедшими всего за 10 лет на водосборе и/или в самом водоеме и, по-видимому, кроются в использовании различных методов анализа, в частности, применении менее совершенных методик в ранние годы исследований.

Последние довольно обширные исследования, выполненные в конце 1970-х – начале 1980-х годов, указывают на то, что в наиболее консервативной водной массе водохранилища – Главном плесе – содержание нитратов, ионов аммония и фосфатов даже в периоды «цветения» водоема сохраняется на относительно высоком уровне. Отмечается тенденция к снижению концентраций биогенных элементов от весны к осени. В других плесах четких закономерностей не прослеживалось [10].

Все сказанное выше подтверждает необходимость детальных и длительных исследований режима биогенных элементов в водах Рыбинского водохранилища на современном этапе. Цель проведенной работы – анализ межгодовых и сезонных закономерностей содержания основных биогенных элементов и их пространственного распределения в водохранилище на основе собственных многолетних исследований.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рыбинское водохранилище является одним из крупнейших искусственных водоемов ( $V=25,4 \text{ км}^3$ ,  $S=4550 \text{ км}^2$ ), оно образовано основными реками – Мологой, Шексней и Волгой. Главную роль в формировании водной массы водохранилища играет Волга (36 % стока), реки Шексна и Молога дают 15 % и 13% соответственно, остальные 36 % приточности приходятся на долю малых и средних рек – Суда, Сить, Согожа и др. По распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водоеме выделено четыре основных плеса – Волжский, Моложский, Шекснинский и Центральный [10]. Первые три располагаются по долинам соответствующих рек и представляют собой вытянутые, довольно узкие участки. Центральный, или Главный плес является собственно водохранилищем.

Несистематические наблюдения на Рыбинском водохранилище проводились в 1990-е годы, а основные данные получены в 2001–2018 гг., когда экспедицион-



**Рис. 1.** Картограмма расположения станций наблюдения на Рыбинском водохранилище:

1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Волково, 4 – Наволок, 5 – Всехсвятское, 6 – Ухра, 7 – Измайлово, 8 – Средний двор, 9 – Гаютино, 10 – Мякса, 11 – Любец, 12 – Ваганиха, 13 – устье Суды, 14 – Устье Кошты, 15 – Ягорба, 16 – Кабачино, 17 – Первомайские острова, 18 – устье Себлы, 19 – Противье, 20 – Брейтово.

Fig. 1. Schematic map of the observation stations' location at the Rybinsk Reservoir: 1 is Koprino, 2 is Mologa, 3 is volkovo, 4 is Navolok, 5 is Vsekhsvyatskoye, 6 is Ukhra, 7 is Izmaylovo, 8 is Sredniy Dvor, 9 is Gayutino, 10 is Myaksa, 11 is Lyubets, 12 is Vaganikha, 13 is the Suda mouth, 14 is the Koshta mouth, 15 is Yagroba, 16 is Kabachino, 17 is Pervomayskiye Ostrova, 18 is the Sebla mouth, 19 is Protivyue, and 20 is Breytovo.

ные исследования организовывались регулярно, с частотой раз в две недели в период открытой воды. Отбор проб производили на шести стандартных станциях (с горизонта 0,5 м), принадлежащих двум основным плесам водоема – Волжскому (станции Коприно и Молога) и Центральному (Наволоок, Измайлово, Средний Двор и Брейтово). По расширенной сетке станций, охватывающей всю акваторию водохранилища, экспедиции проходили не каждый год, максимально 3–4 раза за вегетационный период. Схема отбора проб представлена на рис. 1.

Кроме отмеченных станций также отбирали пробы в районе выпуска промышленного стока г. Череповца. Пробы воды исследовали как непосредственно на судне, так и в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН. Дополнительно к главным формам биогенных элементов анализировали содержание гидроксилamina, одного из важнейших промежуточных продуктов широкомасштабных биохимических процессов – нитрификации, денитрификации, азотфиксации, методом Стрикленда – Парсонса, модифицированным в лаборатории [11]. Нитриты определяли колориметрическим методом после реакции с сульфаниламидом и альфанафтиламином [12], нитраты также колориметрическим методом после восстановления до нитритов омедненным кадмием, ионы аммония после микродиффузионной отгонки и последующей реакции с реактивом Несслера, фосфаты – колориметрическим методом с молибдатом аммония и оловом [12], общий азот и общий фосфор после предварительного окисления органических фракций персульфатом калия до нитратов и ортофосфатов [13, 14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зимний и весенний периоды формируется потенциальный резерв биогенных элементов, определяющий дальнейший уровень развития гидробиоценоза. Процессы нитрификации, начинающиеся осенью при низких температурах, продолжают весь подледный период: при температурах, близких к нулевой, аммоний переходит в наиболее окисленную форму азота – нитраты. Весной концентрация неорганических форм биогенных элементов в воде достигает максимума. В это время водная масса Волжского плеса выделяется более высоким уровнем всех биогенных элементов по сравнению с Центральным (табл. 1).

**Таблица 1.** Среднемноголетние концентрации биогенных элементов в Рыбинском водохранилище весной, мг/л или Р/л

Table 1. Average many-year concentrations of biogenic elements in the Rybinsk Reservoir, mg/l or R/l

Станция	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{NH}_2\text{OH}$ , мкг/л	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{P}_{\text{общ}}$
Весна							
Коприно	0.09	0.010	0.68	1.15	2.4	0.034	0.075
Молога	0.066	0.008	0.49	1.09	1.2	0.023	0.062
Наволоок	0.054	0.004	0.30	1.04	0.75	0.020	0.053
Измайлово	0.052	0.002	0.25	0.95	0.8	0.020	0.053
Ср. Двор	0.052	0.002	0.30	0.92	1.2	0.023	0.050
Брейтово	0.063	0.003	0.27	0.99	1.0	0.023	0.071

В мае на станции Коприно уровень аммонийной формы азота во все исследованные годы был в 1,5–2,5 раза выше, чем на других станциях, а нитратов и нитритов – в 1,5–5 и 1,5–8 раз соответственно. Между концентрациями минеральных форм азота в весенний период на станциях Коприно и Молога различия были незначительными. Минеральные формы в Волжском плесе в период половодья преобладали над органическими, составляя до 60 % от общего азота. На других станциях неорганический азот наблюдался в пределах от 35 % до 38 % от общего. Концентрации фосфатов весной также были в 2–3 раза выше в волжских водах, чем в остальных частях водоема.

Большая площадь водоема, замедленный водообмен ( $k=1,8$ ) и то, что питающие его воды значительно отличаются по химическим и физическим характеристикам, определяющим образом сказывается на сохранении весной водами различного происхождения своих свойств, в итоге в это время они представляют обособленные водные массы. Центральный плес Рыбинского водохранилища в большинстве случаев до середины мая остается заполненным малотрансформированными зимними водами, весенние изменения в химическом составе там наименее заметны.

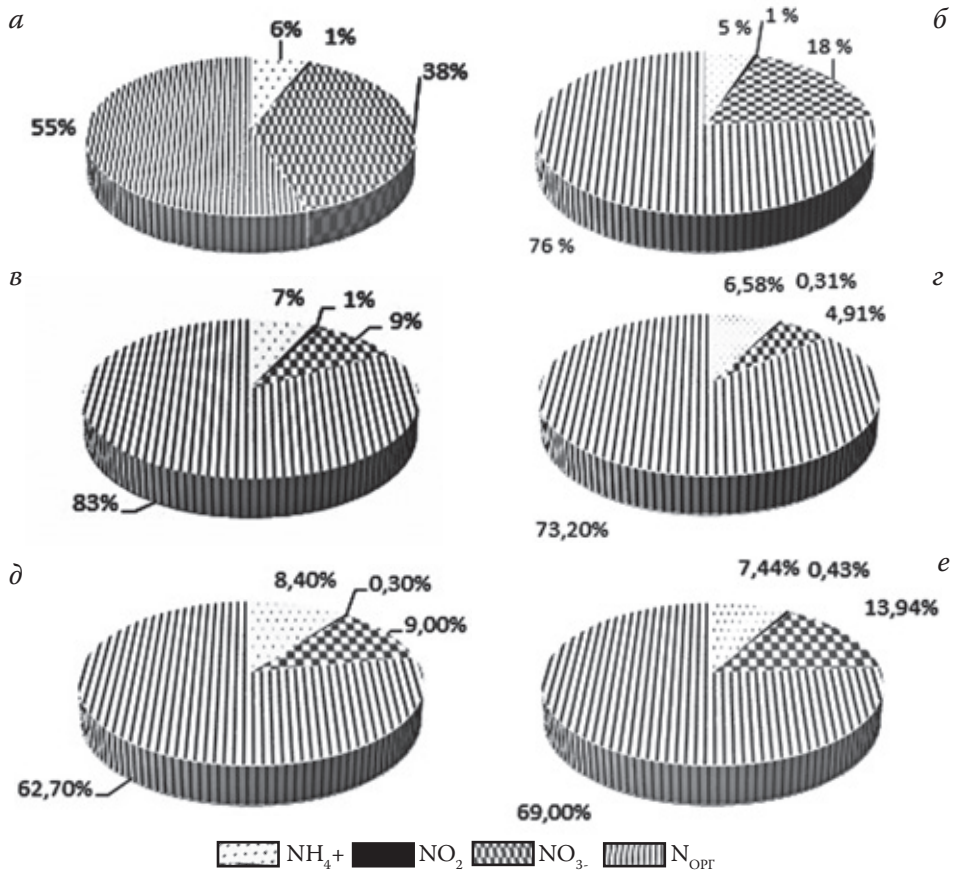
В начале лета в Центральном плесе происходит разбавление зимних вод водами весеннего половодья и частичное их вытеснение, выравнивание химического состава и физических свойств различных частей водоема. Исключение составляет станция Коприно, где содержание неорганических форм азота несколько повышено (табл. 2). В середине-конце лета различия в концентрациях биогенных элементов на станциях исчезают. Для всех плесов в вегетационный период характерно снижение уровня минеральных форм азота при постепенном увеличении доли органического азота, которая возрастает с прогревом водных масс и может достигать в некоторых случаях 95 % от общего (рис. 2).

**Таблица 2.** Среднемноголетние концентрации биогенных элементов в Рыбинском водохранилище летом, 1998–2018 гг., мг/л или Р/л

Table 2. Average many-year concentrations of biogenic materials in the Rybinsk Reservoir during summer time, 1998–2018, mg/l or R/l

Станция	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{NH}_2\text{OH}$ , мкг/л	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{P}_{\text{общ}}$
лето							
Коприно	0.10	0.009	0.18	0.95	2.2	0.040	0.086
Молога	0.065	0.005	0.09	0.89	1.8	0.018	0.074
Наволоки	0.06	0.004	0.15	0.94	1.6	0.015	0.045
Измайлово	0.06	0.004	0.16	0.95	1.4	0.013	0.047
Ср. Двор	0.07	0.004	0.14	0.14	0.95	0.013	0.047
Брейтово	0.06	0.005	0.12	0.99	1.7	0.015	0.049

Концентрация нитритов иногда падает до аналитического нуля. Главными процессами, направленными на понижение концентрации нитратов в вегетационный период, является потребление их фитопланктоном и бактериями. При интенсивной деструкции органических веществ, которая обычно отмеча-



**Рис. 2.** Сезонная динамика относительного содержания форм азота в среднем по водохранилищу: а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – сентябрь, е – октябрь.  
 Fig. 1. Seasonal dynamics of the nitrogen and phosphorous forms average relative content for the Rybinsk Reservoir: a is May, б is June, в is July, г is August, д is September, е is October.

ется при осеннем массовом отмирании планктонных организмов, в окружающей среде резко уменьшается содержание свободного молекулярного кислорода и на локальных участках водохранилища создаются микроаэрофильные или анаэробные условия. В такой ситуации бактерии-денитрификаторы используют связанный кислород нитратов на окисление органических веществ, тем самым существенно понижая его содержание [15]. Количество нитратного азота может снижаться от весны к осени до 60 раз (табл. 1). Однако в летних водах зачастую остаются достаточные количества минеральных форм азота и фосфора, необходимые для поддержания нормального развития фитопланктона. Летом проявляется отклик экосистемы водоема на сформировавшийся режим биогенных элементов.

В начале осени при уменьшении температуры снижается интенсивность фотосинтеза и усилятся процессы деструкции органического вещества, в результате которых происходит выделение в воду ионов аммония, являющих-

ся субстратом для нитрифицирующих бактерий. Поздней осенью возрастает количество нитратов и процент минеральных форм азота в общем его содержании (табл. 3)

**Таблица 3.** Среднемноголетние концентрации биогенных элементов в Рыбинском водохранилище осенью, 1998–2018 гг., мг/л или Р/л

Table 3. Average many-year concentrations of biogenic materials in the Rybinsk Reservoir during fall time, 1998–2018, mg/N or R/l

Станция	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{NH}_2\text{OH}$ , мкг/л	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{P}_{\text{общ}}$
осень							
Коприно	0.106	0.005	0.21	1.08	1	0.058	0.101
Молога	0.080	0.003	0.16	1.13	2.1	0.033	0.060
Наволоч	0.062	0.002	0.09	1.10	0.3	0.013	0.052
Измайлово	0.057	0.002	0.10	1.01	0.2	0.015	0.059
Ср. Двор	0.066	0.002	0.09	0.96	0.3	0.017	0.054
Брейтово	0.059	0.002	0.09	1.05	1.3	0.021	0.062

В вегетационный период на Рыбинском водохранилище концентрация гидроксилamina на всех станциях и во все сезоны – от начала лета до глубокой осени – не превышала 6 мкгN/л. В среднем содержание гидроксилamina в водохранилище в течение исследованного периода было ~2 мкг N/л, что меньше ПДК этого токсического соединения в несколько раз. Рыбохозяйственное ПДК солянокислого гидроксилamina составляет 0,15 мг/л или в пересчете на азот – 16 мкгN/л. Наиболее высокие концентрации отмечены в Волжском плесе.

В течение периода исследования уровень изученных соединений азота и фосфора варьировал в значительных пределах не только в сезонном, но и в межгодовом аспекте. Особенно обращает на себя внимание отличительная особенность межгодовых различий в сезонном распределении концентраций нитратов, которые заключаются в сроках наблюдения минимальных концентраций нитратов и степени их потребления фитопланктоном за вегетационный период (табл. 4).

Следует отметить, что минимальные уровни во все годы наблюдались в августе, за исключением 2013 г. (в сентябре) и экстремально жаркого 2010 г., когда уровень нитратов снизился до минимума уже в июле и держался на этом уровне и в сентябре. Минимальное снижение концентрации в вегетационный период, начиная с мая, до минимального значения отмечено в 2004 г., в 3,5 раза, а максимальное – в 2013 г., в 60 раз. Такое сильное снижение уровня нитратов в вегетационный период обусловлено целым рядом причин: довольно большим весенним запасом биогенных веществ; ранним прогревом верхнего слоя водных масс, в связи с чем происходило мощное развитие фитопланктонных организмов (по данным лаборатории альгологии уровень хлорофилла в августе достигал очень высоких значений – до 120 мкг/л), в процессе которого усилилось потребление неорганических форм биогенных элементов. За исследуемый период отчетливо проявились и тренды увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора (рис. 3). Это связано, скорее всего, с антропоген-



ным загрязнением водохранилища. Такие тренды иногда отмечаются в искусственных водоемах, однако в отдельные периоды тренд может смениться на прямо противоположный [16]. Для Рыбинского водохранилища сложно предсказать, будет ли происходить дальнейшее повышение количества фосфатов и общего фосфора. Если этот процесс будет продолжаться, он неизбежно приведет к повышению трофического статуса водоема. Влияние неантропогенных факторов на концентрацию фосфатов в водах достаточно низкое. Количество остальных биогенных элементов фактически не изменилось: нитратов незначительно снизилось (тренд недостоверен)

**Таблица 4.** Межгодовая динамика уровня нитратов в Рыбинском водохранилище, (средняя по станциям), 2001–2018 г.г, мг/л.

Table 4. Annual dynamics of the nitrates level in the Rybinsk Reservoir (average over all stations), 2001–2018, mg/l

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Снижение, раз
2001	–	0.39	0.15	0.03	0.03	–	–
2004	0.57	0.34	0.27	0.18	0.19	–	3.2
2005	0.49	0.24	0.16	0.12	0.09	0.11	5.8
2006	0.36	0.25	0.08	0.04	0.06	0.10	5.8
2007	0.28	0.12	0.06	0.02	0.04	0.04	15
2008	0.18	0.16	0.08	0.04	0.08	0.16	4.7
2009	–	0.21	0.14	0.06	0.08	0.15	–
2010	0.47	0.17	0.03	0.03	0.03	0.09	15
2011	0.55	0.30	0.11	0.02	0.05	–	24
2012	0.32	0.19	0.16	0.03	0.04	0.07	12.8
2013	0.59	0.30	0.10	0.05	0.01	0.06	59.0
2014	0.22	0.19	0.02	0.01	0.08	0.15	22.0
2015	0.21	0.14	0.09	0.02	0.04	–	10.5
2016	0.24	0.13	0.03	0.02	0.13	0.24	12.0
2017	0.49	0.29	0.20	0.14	0.04	0.12	12.2
2018	0.30	0.25	0.07	0.012	–	0.14	4.3

При анализе всех данных не выявлено высоких коэффициентов парной корреляции между среднемесячными концентрациями аммония, нитритов, нитратов, общего и органического азота, фосфатов и общего фосфора со среднемесячной температурой. Однако графики зависимости отдельных биогенных элементов от температуры воды наглядно указывают на то, что на сезонное распределение исследуемых параметров определяющее влияние оказывает внутригодовой характер изменения температуры воды [17]. Объем водного стока незначительно влияет на уровень биогенных элементов в водохранилище, можно лишь отметить его отрицательную связь с содержанием общего и органического азота.

Результаты расширенных исследований представлены в табл. 5. В Волжском плесе концентрация биогенных элементов в течение почти всех сезонов

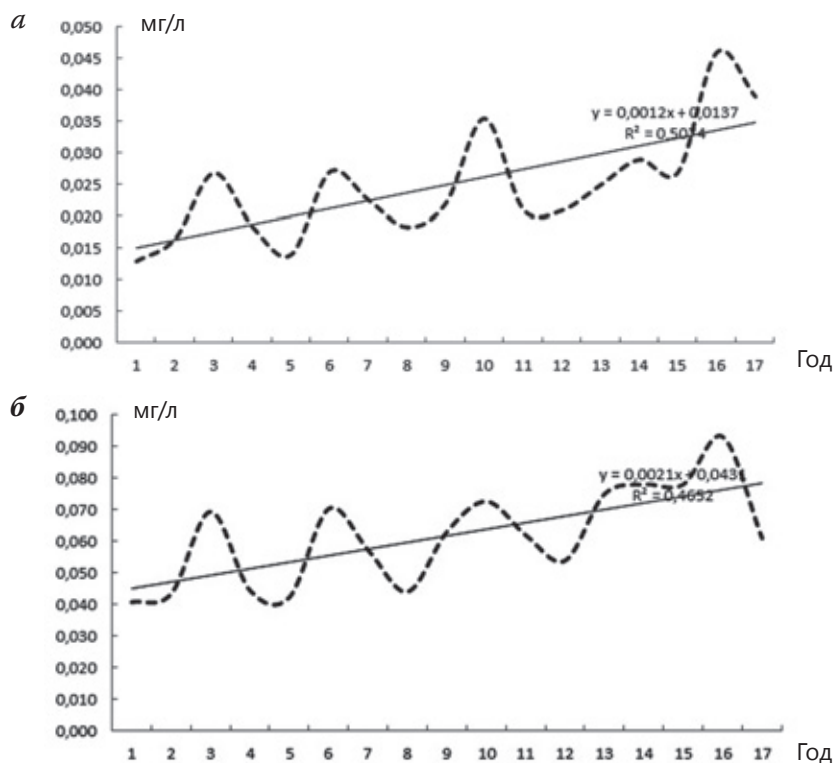


Рис. 3. Динамика уровня биогенных элементов в 2001–2018 гг.:

*а* – фосфаты, *б* – общий фосфор, мг P/л.

Fig. 3. Dynamics of the biogenic elements level in 2001–2018:

*a* – phosphates, *b* – total phosphorous, mg P/l

года наблюдалась выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья северных рек Мологы и Шексны, площадь водосбора которых характеризуется большей залесенностью и заболоченностью почв, меньшей сельскохозяйственной освоенностью. Шекснинский плес, как и Волжский, богат биогенными элементами, особенно в районе выпуска сточных вод в устье р. Кошты, где количество нитратов даже в летнее время достигало 1,3 мгN/л, общего азота – 3,85 мг/л, нитритов – 0,18 мг N/л, что выше рыбохозяйственного ПДК, а общего фосфора – 0,5 мг/л. Воды верхней части этого плеса можно отнести к эвтрофным, далее происходит разбавление водной массы поступающими из Шекснинского водохранилища водами (среднегодовое количество стока Шекснинской ГЭС составляет 5 км<sup>3</sup>, а объем сточных промышленных и бытовых вод всего 0,2 км<sup>3</sup>). В нижней части у станции Гаютино уровень биогенных элементов не отличается от такового в Центральном плесе. Воды Моложского плеса содержат самое низкое количество биогенных элементов.

Из соотношения форм биогенных соединений наиболее информативным является отношение общего азота к общему фосфору, которое в Рыбинском водохранилище за период исследования колебалось в широких пределах, а в

**Таблица 5.** Содержание биогенных элементов в водах плесов

Рыбинского водохранилища, 2006–2018 гг.

Table 5. Biogenic element content in the Rybinsk Reservoir reaches' waters, 2006–2018

Плес	$\text{NO}_2^-$ мг/л	$\text{NO}_3^-$ мг/л	$\text{NH}_2\text{OH}$ , мг/л	$\text{N}_{\text{общ}}$ мг/л	$\text{PO}_4^{3-}$ мг/л	$\text{P}_{\text{общ}}$ мг/л
весна						
Волжский	0.008	0.42	0.005	1.06	0.042	0.070
Моложский	0.001	0.087	0.004	0.90	0.027	0.058
Шекснинский	0.010	0.113	0.002	1.04	0.026	0.057
Главный	0.003	0.118	0.001	0.90	0.036	0.061
лето						
Волжский	0.007	0.134	0.001	1.03	0.036	0.091
Моложский	0.001	0.023	0.001	0.89	0.025	0.072
Шекснинский	0.013	0.118	0.002	1.44	0.043	0.100
Главный	0.004	0.067	0.001	0.89	0.018	0.061
осень						
Волжский	0.006	0.150	0.006	0.96	0.074	0.109
Моложский	0.001	0.015	0.002	0.99	0.028	0.056
Шекснинский	0.006	0.098	0.006	1.16	0.040	0.066
Главный	0.004	0.060	0.001	1.12	0.028	0.065

среднем составило 17,8, следовательно, в водоеме фактически нет лимитирования первичной продукции этими элементами (идет небольшое лимитирование по фосфору). Считается, что при соотношении N:P в водоемах меньше десяти, развитие фитопланктона лимитировано азотом, если оно составляет 10–16, то не лимитировано ни одним из этих элементов, если больше 16, то развитие ограничено фосфором [18, 19]. В Куйбышевском водохранилище растворенные в воде фосфаты являются лимитирующим фактором развития водорослей [20].

### ВЫВОДЫ

Заполнение Рыбинского водохранилища моложско-шекснинской и волжской водами, формирующимися на качественно разных водосборах, в совокупности с особенностями его морфометрии, определяет пространственную неоднородность и временную изменчивость распределения всех изученных химических компонентов.

В рамках проведенного исследования сезонные изменения прослеживались в трех плесах, кроме Шекснинского. В настоящее время по содержанию биогенных элементов воды большей части Рыбинского водохранилища относятся к мезотрофным, кроме Волжского плеса и верхней части Шекснинского, которые можно отнести к эвтрофным. Воды Моложского плеса содержат самое низкое количество биогенных элементов. Отмечено значительное снижение концентрации неорганических форм азота и фосфора летом и начале осени (нитратов до 60 раз) и повышение их в зимний и весенний периоды.

В последние десятилетия прослеживается тенденция увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора, это связано с тем, что поступление фосфора в водоем из антропогенных источников росло и продолжает расти быстрее, чем азота. Эта тенденция впоследствии может привести к повышению эвтрофного статуса Рыбинского водохранилища. В настоящее время исследования продолжают.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М: Геос, 2007. 252 с.
2. Трифонова Н.А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище: автореф. дис.... канд. биол. наук. М., 1974. 28 с.
3. Sondergaard M., Lauridsen T.L., Johansson L.S., Jeppesen E. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover // *Hydrobiologia*. 2017. Vol. 795. P. 35–48.
4. Щербаков А.П. Гидрохимический режим Волги, Мологи, Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища) // *Труды биологической станции «Борок»*. 1950. Вып. 1. С. 7–34.
5. Воронков П.П. Основные черты формирования гидрохимического режима. Рыбинского водохранилища // *Труды ГТИ*. 1951. Вып. 2. С. 167–238.
6. Кудрявцев Д.Д. Материалы к гидрохимической характеристике Волжского отрога Рыбинского водохранилища в 1943–1946 гг. // *Труды биологической станции «Борок»*. 1950. Вып. 1. С. 35–79.
7. Аничкова Н.И. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища // *Труды Дарвинского государственного заповедника. Вологда: Вологодское книжное изд-во*. 1959. Вып. 5. С. 191–208.
8. Киреева А.С. Некоторые данные по гидрохимии Рыбинского водохранилища // *Труды биологической станции «Борок»*. 1955. Вып. 2. С. 335–350.
9. Былинкина А.А. Содержание азота и фосфора в воде Рыбинского водохранилища в период автотрофной стадии его функционирования. *Труды ИБВВ РАН*. 1993. Вып. 67–70. С. 28–41.
10. Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1972. 364 с.
11. Степанова И.Э. Методы определения гидразина и гидроксилamina в природных водах // *Экологическая химия*. 1917. 26 (1). С 25–33.
12. Семенов А.Д. Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 540 с.
13. Гапеева М.В., Разгулин С.М., Скопинцев Б.А. Ампульный персульфатный метод определения общего азота в природных водах. *Гидрохимические материалы*. 1984. Т. 87. С. 67–70.
14. Бикбулатов Э.С. О методе определения общего фосфора в природных водах. *Гидрохимические материалы*. 1974. Т. 60. С. 167–173.
15. Гудков А.Г. Биологическая очистка городских сточных вод: уч. Пособие. Вологда: ВоГТУ, 2002. 127 с.
16. Vystavna Y., Heizlar J., Kopachek J. Long-term trends of phosphorus concentration in artificial lake: Socioeconomic and climat drivers. 2017. Plos one <http://doi.org/10.1371/journal.pone0186917>.
17. Литвинов А.С., Степанова И.Э. Зависимость содержания органического вещества и биогенных элементов от гидрологических условий в Рыбинском водохранилище. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 3. С 20–31. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-2.
18. Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv Fur Hydrobiologie*. Vol. 62. No. 1. P. 1–28.
19. Doering P.H., Oviat C.A., Nowicki B.L., Klos E.G., Reed L.W. Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient. *Marine progress series*. 1995. Vol.124. P. 271–287.
20. Селезнева А.В., Беспалова, К.В., Селезнев В.А. Содержание растворенного неорганического фосфора в воде Куйбышевского водохранилища // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 2. С. 35–44. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3.

## REFERENCES

1. Datsenko Y.S. Eutrophication of reservoirs. Hydrological/hydro/chemical aspects. M: Geos, 2007. 252 p. (In Russ.).
2. Trifonova N.A. Nitrogen compounds in the Rybinsk Reservoir: abstract of the thesis for the Candidate of Biological Sciences. M., 1974. 28 p. (In Russ.).
3. Sondergaard M., Lauridsen T.L., Johansson L.S., Jeppesen E. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover. *Hydrobiologia*. 2017. Vol. 795. P. 35–48.
4. Shcherbakov A.P. Hydro/chemical regime of the Volga, Mologa, and Sheksna near the Rybinsk Reservoir (prior to the reservoir filling). *Transactions of the "Borok" biological station*. 1950. Iss. 1. P. 7–34 (In Russ.).
5. Voronkov P.P. The main features of the Rybinsk Reservoir hydro/chemical regime formation. *Transactions of GGI*. 1951. Iss. 2. P. 167–238 (In Russ.).
6. Kudryavtsev D.D. Materials to hydro/chemical characteristics of the Rybinsk Reservoir Volga Branch in 1943–1946. *Transactions of the "Borok" biological station*. 1950. Iss. 1. P. 35–79 (In Russ.).
7. Anichkova N.I. Some features of the Rybinsk Reservoir northern part hydro/chemical regime. *Transactions of the Darwin State Reserve*. Vologda: Voogda Book Publishing House. 1959. Iss. 5. P. 191–208 (In Russ.).
8. Kireyeva A.S. Some data on the Rybinsk Reservoir hydro/chemistry. *Transactions of the "Borok" biological station*. 1955. Iss. 2. P. 335–350 (In Russ.).
9. Bylinkina A.A. Nitrogen and phosphorous content in the Rybinsk Reservoir water during the autotrophic stage of its functioning. *Transactions of RAS IBVV*. 1993. Iss. 67–70. P. 28–41 (In Russ.).
10. The Rybinsk Reservoir and its life. L.: Science, 1972. 364 p. (In Russ.).
11. Stepanova I.E. Methods of hydrazine and hydroxylamine determination in natural waters. *Ecological chemistry*. 1917. 26 (1). P. 25–33 (In Russ.).
12. Semenov A.D. Practical guidelines on the inland water chemical analysis. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 540 p. (In Russ.).
13. Gapeyeva M.V., Razgulin S.M., Skopintsev B.A. An ampule peroxydisulfate method of the total nitrogen determination in natural waters. *Hydro/chemical materials*. 1984. Vol. 87. P. 67–70 (In Russ.).
14. Bikbulatov E.S. About the method of the total phosphorous determination in natural waters. *Hydro/chemical materials*. 1974. Vol. 60. P. 167–173 (In Russ.).
15. Gudkov A.G. Biological treatment of urban wastewater: Manual. Vologda: VoGTU, 2002. 127 p. (In Russ.).
16. Vystavna Y., Heizlar J., Kopachek J. Long-term trends of phosphorus concentration in artificial lake: Socioeconomic and climate drivers. 2017. Plos one <http://doi.org/10.1371/journal.pone0186917>.
17. Litvinov A.S., Stepanova I.E. Dependence of the organic matter and biogenic elements concentration on hydrological conditions in the Rybinsk Reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No. 3. P. 20–31. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-2 (In Russ.).
18. Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv Fur Hydrobiologie*. Vol. 62. No. 1. P. 1–28.
19. Doering P.H., Oviat C.A., Nowicki B.L., Klos E.G., Reed L.W. Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient. *Marine progress series*. 1995. Vol. 124. P. 271–287.
20. Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A. Content of the dissolve non-organic phosphorous in the Kuybyshev Reservoir water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. No. 2. P. 35–44. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3 (In Russ.).

**Сведения об авторе:**

**Степанова Ирина Эрнстовна**, научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109; e-mail: [iris@ibiw.ru](mailto:iris@ibiw.ru)

**About the author:**

**Irina E. Stepanova**, Researcher, Laboratory of Hydrology and Hydro/chemistry of the Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Water Biology; 109, Borok, Nekous Rayon, Yaroslavl Oblast, Russia; e-mail: [iris@ibiw.ru](mailto:iris@ibiw.ru)