

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ динамики СОДЕРЖАНИЯ **БИОГЕННЫХ** **ЭЛЕМЕНТОВ** В ВОДАХ РЫБИНСКОГО водохранилища ЗА ГОДЫ ЕГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

**Проведен анализ межгодовых и сезонных изменений содержания основных биогенных элементов в Рыбинском водохранилище за весь период его существования на основе литературных данных и собственных многолетних исследований.**

**Показано, что распределение и особенности вариации соединений азота и фосфора в различных частях водохранилища находятся в прямой зависимости от динамики водных масс, которая, в свою очередь, обусловлена морфометрией водоема и гидрологическими условиями.**

**Полученные за последние 40 лет данные указывают на то, что сезонные изменения в концентрациях соединений азота и фосфора находятся в пределах их естественных колебаний, свидетельствуя о стабилизации режима биогенных элементов в Рыбинском водохранилище.**

## Введение

**П**ри оценке современного состояния водных экосистем и прогноза его изменения часто опираются на данные мониторинговых наблюдений за содержанием основных биогенных элементов — соединений азота и фосфора. Полученные на основе таких наблюдений средние и экстремальные величины являются одним из важнейших критериев трофического состояния водоемов в различные гидрологические

**И.Э. Степанова,**  
научный сотрудник  
лаборатории гидро-  
логии и гидрохимии,  
ФГБУН Институт био-  
логии внутренних вод  
Российской академии  
наук

**Э.С. Бикбулатов,**  
кандидат химиче-  
ских наук, ведущий  
научный сотрудник  
лаборатории гидро-  
логии и гидрохимии,  
ФГБУН Институт био-  
логии внутренних вод  
Российской академии  
наук

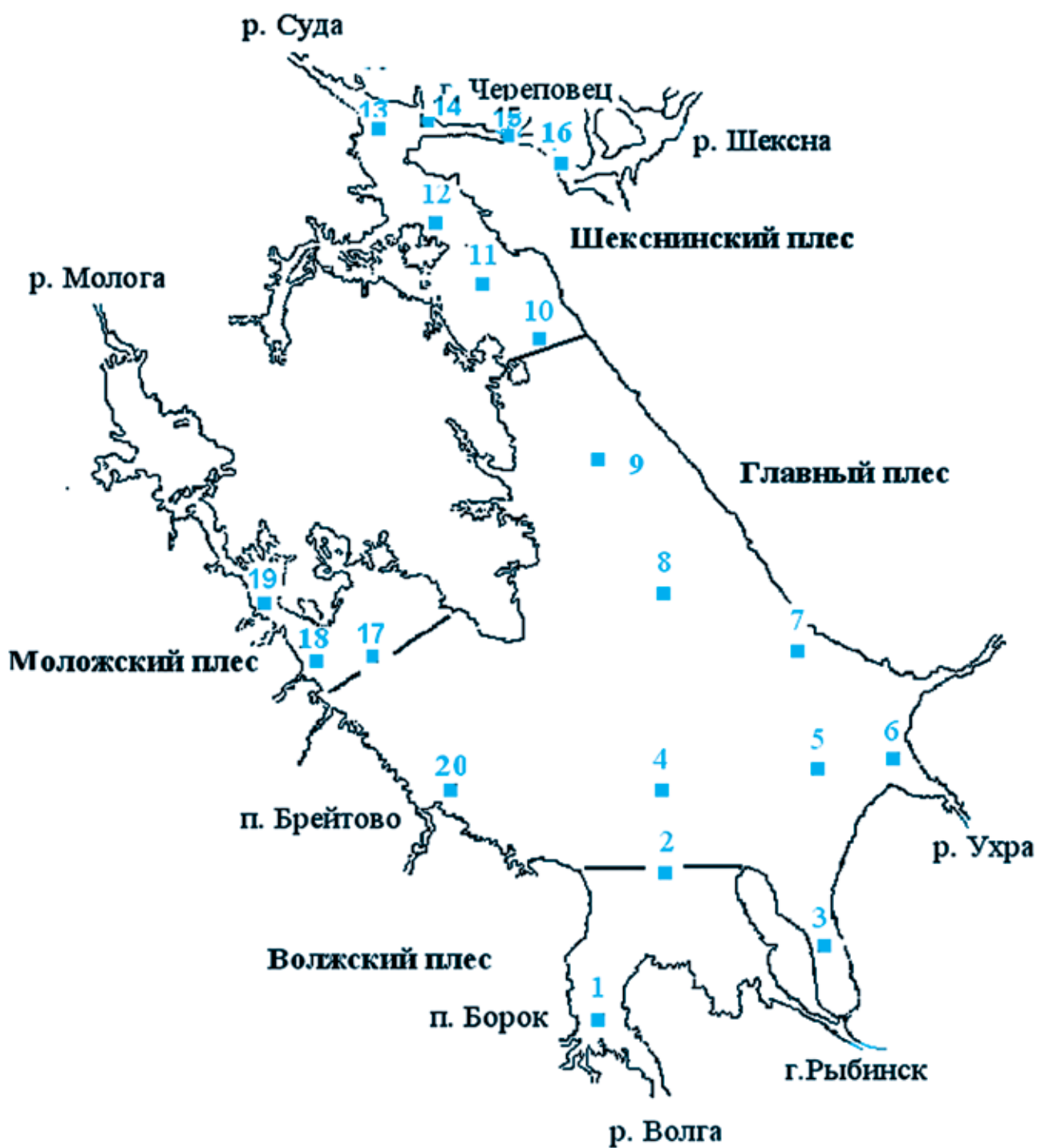
**Е.М. Бикбулатова\*,**  
кандидат химических  
наук, старший на-  
учный сотрудник  
лаборатории гидро-  
логии и гидрохимии,  
ФГБУН Институт био-  
логии внутренних вод  
Российской академии  
наук



фазы их жизненного цикла. На одном из крупнейших водоемов волжского каскада — Рыбинском водохранилище исследования подобного рода проводились неоднократно. Однако они были несистематическими и поэтому носят разрозненный характер. Отсутствуют обобщающие работы, дающие полную характеристику изменчивости важнейших биогенных элементов за весь период существования водоема.

Целью работы является анализ межгодовых и сезонных закономерностей содержания основных биогенных элементов в водохранилище на основе литературных данных и собственных многолетних исследований.

\*Адрес для корреспонденции: [iris@biw.yaroslavl.ru](mailto:iris@biw.yaroslavl.ru)



**Рис. 1.** Карта-схема 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 — Мяса, 11 — Любец, 12 — Ваганиха, 13 — Устье Суды, 14 — Устье Кошты, 15 — Ягорба, 16 — Кабачино, 17 — Первомайские острова, 18 — Устье Себлы, 19 — Противье, 20 — Брейтово.

Кроме отмеченных станций также отбирали пробы в районе выпуска промстока г. Череповец.

## Материалы и методы исследования

**М**атериалы по основным формам азота и фосфора собраны в период открытой воды с 2001 по 2008 гг. В 2001-2006 гг. наблюдения проводили на 6 стандартных станциях (1, 2, 4, 8, 9, 20) основной акватории Рыбинского водохранилища [1]. В 2007-2008 гг. сетка станций была расширена (рис. 1).

Определения проводились стандартными методами анализа и их модификациями, апробированными в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН. Впервые было обращено внимание на промежуточный продукт трансформации азота – гидроксилламин, который образуется как в результате протекания двух противоположно направленных процессов – нитрификации-денитрификации, так и азотфиксации.

Использованы также доступные нам литературные источники, начиная со времени до зарегулирования рек Волга, Шексна, Молога вплоть до 80-х годов прошлого века уже на основной акватории водоема.

## Результаты и их обсуждение

**П**о распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водоеме выделено четыре плеса [1]: Волжский, Моложский, Шекснинский и Центральный. Первые три располагаются по долинам соответствующих рек и представляют собой вытянутые, довольно узкие участки. Основную часть акватории занимает Центральный плес.

Наибольшую роль в формировании водной массы Рыбинского водохранилища играет р. Волга (36 % стока); реки Шексна и Молога дают 15 и 13 %, соответственно. Остальные 36 % приточности приходится на долю малых и средних рек (Суда, Сить, Согожа и др.).

Исследования состава воды рек Волга, Молога и Шексна, которые были предназначены для заполнения строящегося Рыбинского водохранилища, начались до перекрытия их плотиной. Содержание минеральных форм азота перед заполнением водоема (1939-1941 гг.) в речных водах было довольно высоким [2]. Концентрация нитритов и нитратов в реках Волга и Молога достигала максимума в период весеннего

Таблица 1

Содержание минеральных форм азота и фосфора в 1939-1941 гг. (приведены средние значения за три года по исходным данным [2])\*

| Сезон              | р. Волга | р. Молога | р. Шексна |
|--------------------|----------|-----------|-----------|
| $\text{NH}_4^+$    |          |           |           |
| Зима               | 0,20     | 0,20      | 0,19      |
| Весна              | 0,12     | 0,14      | 0,17      |
| Лето               | 0,06     | 0,07      | 0,07      |
| Осень              | 0,06     | 0,06      | -         |
| Среднее            | 0,11     | 0,12      | 0,14      |
| $\text{NO}_3^-$    |          |           |           |
| Зима               | 0,43     | 0,28      | 0,32      |
| Весна              | 0,70     | 0,55      | 0,15      |
| Лето               | 0,05     | 0         | 0,02      |
| Осень              | 0,05     | 0         | -         |
| Среднее            | 0,31     | 0,21      | 0,16      |
| $\text{NO}_2^-$    |          |           |           |
| Зима               | 0,004    | 0,013     | 0,002     |
| Весна              | 0,011    | 0,007     | 0,003     |
| Лето               | 0,002    | 0         | 0,001     |
| Осень              | 0,005    | 0,001     | -         |
| Среднее            | 0,005    | 0,005     | 0,002     |
| $\text{PO}_4^{3-}$ |          |           |           |
| Зима               | 0,12     | 0,16      | 0,11      |
| Весна              | 0,09     | 0,09      | 0,11      |
| Лето               | 0,05     | 0,12      | 0,07      |
| Осень              | 0,09     | 0,13      | -         |
| Среднее            | 0,09     | 0,12      | 0,09      |

\*В этой и других таблицах, а также в тексте значения концентраций азотсодержащих компонентов приведены в мг N/л, фосфора в мг P/л.

Таблица 2

Содержание минеральных форм азота и фосфора в плесах водохранилища в 1946 г. [5]

| Плеса       | $\text{NO}_3^-$ , | $\text{NO}_2$ | $\text{PO}_4^{3-}$ , |
|-------------|-------------------|---------------|----------------------|
|             | Август            |               |                      |
| Волжский    | -                 | -             | -                    |
| Моложский   | 0,07              | 0,001         | 0,034                |
| Шекснинский | 0,03              | 0,003         | 0,055                |
| Главный     | 0,07              | 0,003         | 0,079                |
| Среднее     | 0,06              | 0,003         | 0,056                |
|             | Сентябрь          |               |                      |
| Волжский    | 0,17              | 0,013         | 0,097                |
| Моложский   | 0,13              | 0,002         | 0,100                |
| Шекснинский | 0,07              | 0,006         | 0,088                |
| Главный     | 0,13              | 0,002         | 0,114                |
| Среднее     | 0,12              | 0,006         | 0,099                |

половодья (0,022 и 1,4 мгN/л, соответственно). Минимум содержания всех форм азота приходился на период вегетации, причем нитриты и нитраты исчезали полностью, а аммонийный азот и фосфаты оставались в небольшом количестве (табл. 1).

Сведения о гидрохимическом режиме водохранилища в первые годы его существования весьма отрывочны. В 1943-1946 гг. изучалось содержание минеральных форм азота только в Волжском и Моложском плесах [3, 4]. Сезонные вариации содержания соответствующих компонентов в указанные годы не выявляют какой-либо определенной закономерности. Сопоставление концентрации этих веществ в реках до заполнения водохранилища и в первые годы его эксплуатации указывает лишь на тенденцию снижения количества нитратного и повышению аммонийного азота в Волжском плесе.

В 1946-1947 гг. проводились еженедельные определения нитратов и фосфатов на ст. Молога (главный плес) в период открытой воды, а также разово в ноябре, январе и апреле 1946 г. [5, 6]. Летом содержание нитратов падало до 0 и в целом не превышало 0,06 мг/л. Концентрация фосфатов была довольно высокой даже в период вегетации водорослей (от 10 до 100 мкг/л). На основании этого было предположено, что в водохранилище первичная продук-

ция в большинстве случаев лимитируется соединениями азота [1, 7]. Сравнение содержания минеральных форм азота во всех четырех плесах, проведенное в сентябре и августе 1946 г., показало, что в Волжском плесе они максимальны, а в остальных ниже и близки по величине (табл. 2).

В начале 50-х годов исследования пространственного и сезонного распределений биогенных элементов было продолжено [1, 8] (табл. 3). Отмеченное в это время резкое уменьшение количества фосфатов в трех (кроме Волжского) плесах водохранилища (до 1-6 мкг/л в период вегетации) свидетельствует о его переходе из разряда водоемов, лимитированных по азоту, в водоемы, в которых фотосинтез лимитирован по фосфору. Это обстоятельство может служить свидетельством окончания распада органического вещества затопленной растительности и стабилизации состояния водоема. Напротив, содержание фосфора в воде Волжского плеса было максимальным, а амплитуда колебаний его концентрации — минимальной, указывая на возможное загрязнение речных вод бытовыми и промышленными стоками городов, расположенных на берегах р. Волга.

Содержание аммонийной формы азота изменялось в течение года от 0,05 до 0,57 мг/л. Наиболее высоким оно было

в Моложском и Шекснинском плесах, что, вероятно, определяется болотным питанием притоков. В весенних водах Волжского и Центрального плесов вследствие прошедшей в зимний период нитрификации содержание нитратов достигало своего максимума, а летом и осенью их концентрация варьировала около величины 0,05 мг N/л по всей акватории водохранилища.

При изучении распределения форм азота и фосфора в шестидесятые годы было отмечено, что наибольшие изменения азотсодержащих компонентов в водной массе Волжского плеса происходят в подледный период. Так, содержание аммонийной фор-

мы азота за время, прошедшее с февраля до середины апреля (когда идет поступление весенних талых вод) возрастало в 10-15 раз [9], чего не отмечалось в первые годы после заполнения водохранилища. Были выделены некоторые общие закономерности, характерные для всего водоема: максимальные концентрации общего и минимальные минерального азота отмечены в летнее время; основной формой этого элемента являлась органическая, составляющая от 68 до 98 % общей.

В семидесятые годы была дана обобщающая характеристика гидрохимического и гидрологического режима Рыбинского

**Таблица 3**

**Содержание минеральных форм азота и фосфора в плесах водохранилища в 1952-1953 гг. [8]**

| Месяцы             | Шекснинский | Моложский | Волжский | Центральный |
|--------------------|-------------|-----------|----------|-------------|
| $\text{NO}_3^-$    |             |           |          |             |
| Май                | 0,10        | 0,09      | 0,17     | 0,18        |
| Июнь               | 0,07        | 0,06      | 0,04     | 0,05        |
| Июль               | 0,04        | 0,05      | 0,06     | 0,06        |
| Сентябрь           | 0,08        | 0,10      | 0,05     | 0,04        |
| Октябрь            | 0,04        | 0,05      | 0,04     | 0,05        |
| Среднее            | 0,07        | 0,07      | 0,07     | 0,08        |
| $\text{NH}_4^+$    |             |           |          |             |
| Май                | 0,35        | 0,20      | 0,20     | 0,17        |
| Июнь               | 0,38        | 0,07      | 0,11     | 0,14        |
| Июль               | 0,04        | 0,05      | 0,06     | 0,08        |
| Сентябрь           | 0,48        | 0,57      | 0,28     | 0,33        |
| Октябрь            | 0,31        | 0,25      | 0,31     | 0,14        |
| Среднее            | 0,31        | 0,23      | 0,19     | 0,17        |
| $\text{PO}_4^{3-}$ |             |           |          |             |
| Май                | 0,018       | 0,020     | 0,026    | 0,029       |
| Июнь               | 0,018       | 0,008     | 0,022    | 0,009       |
| Июль               | 0,001       | 0,006     | 0,012    | 0,004       |
| Сентябрь           | 0,018       | 0,018     | 0,015    | 0,002       |
| Октябрь            | 0,010       | 0,019     | 0,016    | 0,011       |
| Ноябрь             | -           | -         | 0,012    | 0,035       |
| Среднее            | 0,012       | 0,014     | 0,018    | 0,013       |

Таблица 4

Содержание форм азота и фосфора в 1965 г. [10]

| Плес        | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $N_{\text{общ}}$ | $NO_3^-$ | $NO_2^-$ | $NH_4^-$ |
|-------------|------------------|------------------|------------------|----------|----------|----------|
|             |                  |                  | Весна            |          |          |          |
| Волжский    | 0,067            | 0,031            | 1,60             | 0,72     | 0,008    | 0,46     |
| Моложский   | 0,035            | 0,002            | 0,80             | 0,003    | 0,001    | 0,34     |
| Шекснинский | 0,046            | 0,010            | 0,83             | 0,07     | 0,001    | 0,21     |
| Главный     | 0,037            | 0,005            | 1,03             | 0,26     | 0,002    | 0,28     |
|             |                  |                  | Лето             |          |          |          |
| Волжский    | 0,072            | 0,027            | 1,61             | 0,26     | 0,008    | 0,09     |
| Моложский   | 0,035            | 0,002            | 0,80             | 0,003    | 0,001    | 0,34     |
| Шекснинский | 0,046            | 0,010            | 0,83             | 0,07     | 0,001    | 0,21     |
| Главный     | 0,037            | 0,005            | 1,03             | 0,26     | 0,002    | 0,28     |
|             |                  |                  | Осень            |          |          |          |
| Волжский    | 0,073            | 0,044            | 1,57             | 0,26     | 0,005    | 0,02     |
| Моложский   | 0,038            | 0,013            | 0,90             | 0,10     | 0,000    | 0,19     |
| Шекснинский | 0,056            | 0,021            | 1,53             | 0,17     | 0,002    | 0,09     |
| Главный     | 0,047            | 0,013            | 1,17             | 0,17     | 0,002    | 0,02     |
|             |                  |                  | Зима             |          |          |          |
| Волжский    | 0,051            | 0,031            | 1,69             | 0,38     | 0,031    | 0,56     |
| Моложский   | 0,033            | 0,021            | 0,79             | 0,08     | 0,021    | 0,06     |
| Главный     | 0,033            | 0,013            | 1,13             | 0,28     | 0,016    | 0,19     |

водохранилища [1, 11]. Отмечено, что пространственная и сезонная неоднородность содержания минеральных и органических форм азота и фосфора в водных массах определяются, в основном, характером питания и особенностью его морфометрии. В Волжском плесе (ст. Коприно) концентрация этих элементов в течение почти всех сезонов года значительно выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья северных рек Молога и Шексна, площадь водосбора которых характеризуется большей залесенностью и заболоченностью почв, меньшей сельскохозяйственной освоенностью. На режим биогенных элементов в водоеме также большое влияние оказывают сточные воды городов, особенно Твери и Череповца [12, 13], причем в Волжский плес поступает большое количество промышленных сточных вод с высоким содержанием аммонийного азота.

В конце семидесятых — начале восьмидесятых годов подробные исследования пространственного распределения биогенных

элементов в водоеме [14-16], показали, что в Главном плесе содержание неорганических форм азота было довольно высоким даже в период вегетации синезеленых и зеленых водорослей и отмечалась тенденция его снижения от весны к осени. Однако в других плесах четких закономерностей не прослеживалось. Наиболее высокое их содержание в этот период, как и в предыдущий, было характерно для волжских вод.

При сравнении концентраций минеральных и общих форм азота и фосфора в 1965 и 1989 гг. [17] можно отметить, что они сохранились на прежнем уровне в Главном плесе водохранилища. Однако в Шекснинском плесе в районе г. Череповец содержание биогенов было высоким. На глубоководных станциях Волжского плеса летом 1989 г., в отличие от 1965 г., получены более низкие концентрации общего азота и более высокие (в среднем на 20 %) общего фосфора. Уровень нитритного и нитратного азота был одинаков. В последующее десятилетие сведения о содержании биогенов в водохранилище были отрывочными (табл. 4,5).

Таблица 5

Содержание биогенных элементов в 1982 г. [16]

| Плес        | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $N_{\text{общ}}$ | $NO_3^-$ | $NH_4^-$ |
|-------------|------------------|------------------|------------------|----------|----------|
| Весна       |                  |                  |                  |          |          |
| Волжский    | 0,071            | 0,03             | 2,25             | 1,1      | 0,15     |
| Моложский   | 0,05             | 0,03             | 1                | 0,17     | 0,02     |
| Шекснинский | 0,07             | 0,04             | 1                | 0,42     | 0,02     |
| Главный     | 0,096            | 0,04             | 1,6              | 0,76     | 0,07     |
| Лето        |                  |                  |                  |          |          |
| Волжский    | 0,08             | 0,03             | 1,14             | 0,36     | 0,08     |
| Моложский   | 0,08             | 0,02             | 0,7              | 0,09     | 0,04     |
| Шекснинский | 0,06             | 0,03             | 0,88             | 0,13     | 0,06     |
| Главный     | 0,066            | 0,016            | 1,07             | 0,37     | 0,07     |
| Осень       |                  |                  |                  |          |          |
| Волжский    | 0,09             | 0,07             | 1,18             | 0,43     | 0,07     |
| Моложский   | 0,054            | 0,025            | 0,75             | 0,07     | 0,03     |
| Шекснинский | 0,07             | 0,022            | 0,92             | 0,16     | 0,06     |
| Главный     | 0,068            | 0,018            | 1,11             | 0,24     | 0,05     |
| Зима        |                  |                  |                  |          |          |
| Волжский    | 0,071            | 0,045            | 2,13             | 0,85     | 0,26     |
| Главный     | 0,065            | 0,037            | 1,17             | 0,49     | 0,10     |

Как уже отмечалось во вводной части, нами были продолжены исследования пространственного и сезонного распределения соединений азота и фосфора в водохранилище в период открытой воды с 2001 по 2008 г.

На основании полученных результатов (табл. 6-8) и ряда литературных источников можно охарактеризовать общий ход сезонных изменений содержания биогенов в водоеме.

**Зима.** Исследования содержания биогенов в зимний период показали, что в конце зимы воды Рыбинского водохранилища отличаются понижением содержания общего азота. Уровень органического азота также уменьшается и в среднем составляет 57 % от общего. Содержание минерального азота значительно возрастает, достигая 0,48 мг/л. Данные, полученные при определении различных азотных соединений во взвесах, позволяют сделать вывод, что зимой азот находится большей частью в растворенном состоянии. Различия между водными массами становятся более значительными и увели-

чиваются к концу подледного периода как по общему содержанию азота, так и по соотношению его минеральных форм. Уровень общего азота и всех его форм в Волжском плесе гораздо выше, чем в остальных плесах водохранилища, а в Моложском отмечены самые низкие концентрации всех исследованных элементов.

В зимнее время концентрации общего фосфора минимальны во всех плесах водохранилища, минеральный фосфор преобладает над органическим.

**Весна.** Большая площадь, замедленный водообмен, а также то, что воды, питающие водохранилище, имеют существенные различия по химическим и физическим свойствам, способствуют тому, что весной воды различного происхождения в определенных районах более или менее длительное время сохраняют свои свойства и представляют обособленные водные массы. Весенние изменения наименее заметны в Центральном плесе водохранилища, поскольку вплоть до середины мая эта часть водоема остает-

**Таблица 6**

**Содержание биогенных элементов в Рыбинском водохранилище на стандартных станциях (среднее за 2001-2008 гг.)**

|           | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $N_{\text{общ}}$ | $NO_2^-$ | $NO_3^-$ | $NH_4^+$ | $NH_2OH$ |
|-----------|------------------|------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| весна     |                  |                  |                  |          |          |          |          |
| Коприно   | 0,049            | 0,030            | 0,81             | 0,015    | 0,81     | 0,097    | 0,002    |
| Молога    | 0,038            | 0,014            | 0,56             | 0,009    | 0,56     | 0,060    | 0,001    |
| Наволоч   | 0,028            | 0,012            | 0,34             | 0,004    | 0,34     | 0,050    | 0,001    |
| Измайлово | 0,031            | 0,009            | 0,23             | 0,002    | 0,23     | 0,058    | 0,001    |
| Ср. двор  | 0,030            | 0,014            | 0,25             | 0,001    | 0,25     | 0,053    | 0,001    |
| Брейтово  | 0,038            | 0,015            | 0,29             | 0,001    | 0,29     | 0,059    | 0,001    |
| лето      |                  |                  |                  |          |          |          |          |
| Коприно   | 0,068            | 0,037            | 1,12             | 0,012    | 0,24     | 0,05     | 0,003    |
| Молога    | 0,063            | 0,022            | 1,05             | 0,006    | 0,15     | 0,09     | 0,002    |
| Наволоч   | 0,045            | 0,015            | 0,94             | 0,004    | 0,15     | 0,063    | 0,002    |
| Измайлово | 0,047            | 0,013            | 0,95             | 0,004    | 0,16     | 0,059    | 0,001    |
| Ср. двор  | 0,047            | 0,013            | 0,14             | 0,004    | 0,14     | 0,067    | 0,001    |
| Брейтово  | 0,049            | 0,015            | 0,99             | 0,005    | 0,12     | 0,064    | 0,002    |
| осень     |                  |                  |                  |          |          |          |          |
| Коприно   | 0,101            | 0,058            | 1,08             | 0,005    | 0,21     | 0,106    | 0,001    |
| Молога    | 0,060            | 0,033            | 1,13             | 0,003    | 0,16     | 0,080    | 0,002    |
| Наволоч   | 0,052            | 0,013            | 1,10             | 0,002    | 0,09     | 0,062    | 0,001    |
| Измайлово | 0,059            | 0,015            | 1,01             | 0,002    | 0,10     | 0,057    | 0,001    |
| Ср. двор  | 0,054            | 0,017            | 0,96             | 0,002    | 0,09     | 0,066    | 0,001    |
| Брейтово  | 0,062            | 0,021            | 1,05             | 0,002    | 0,09     | 0,059    | 0,001    |

ся заполненной еще сохраняющимися зимними водами. В этот период соотношение минерального и органического азота примерно одинаково, отмечается превышение аммонийного азота над нитратным, сумма нитратного и аммонийного азота составляет наибольшую для всех сезонов величину. Уровень нитратов достигает 1 мг/л, а нитритов – 0,05 мг/л (на ст. Коприно)

Волжские воды также значительно отличаются от весенних вод других плесов как по содержанию общего азота, так и по соотношению его форм (табл. 6); они заметно богаче биогенными элементами, в том числе и соединениями фосфора. В мае на ст. Коприно уровень аммонийной формы азота во все исследованные годы был в 1,5-3 раза выше, чем на других станциях, а нитратов и нитри-

тов в 1,5-6 и 1,5-10 раз, соответственно. На ст. Молога содержание минеральных форм азота весной отличалось от такового на ст. Коприно незначительно, так как моложский участок также был заполнен зимними волжскими водами, которые в это время распространяются дальше, чем в периоды с меньшей водной нагрузкой [1]. Минеральные формы азота в Волжском плесе в период половодья преобладали над органическими, составляя 67-78 % от общего азота. На других стандартных станциях органический азот составлял от 40 до 55 % от общего. Максимальные концентрации фосфатов были также отмечены в волжских водах, на ст. Коприно они достигали 0,091 мг/л, что превышало таковые в Главном плесе в 2-6 раз.

**Лето.** Находящиеся весной в центральной части водоема зимние воды разбавляются водами весеннего половодья и частично вытесняются ими. В это время воды различных частей водоема по своему химическому составу и физическим свойствам довольно однородны. Только в Волжском плесе (ст. Коприно) несколько повышено содержание нитратов, нитритов и гидроксилamina, что определяет более низкий процент органического азота. В начале лета концентрация нитритов в Волжском плесе обычно остается еще довольно высокой, достигая в отдельные годы 0,024 мкг/л. На ст. Молога их содержание такое же, как в Главном плесе, так как к указанному времени эта часть акватории обычно заполняется основными водными массами. Для всех плесов водоема характерно уменьшение концентрации минеральных форм азота при сохранении содержания органического азота. Ранним летом на всех исследованных станциях Норг составляет более 50 % от общего. В связи с последующим прогревом водных масс и интенсификацией развития фитопланктона этот процент увеличивается и может достигать 94-95 %. Нередко количество нитритов на всех станциях достигало аналитического нуля. Однако в летних водах зачастую остаются достаточные количества нитратов и фосфора, необходимые для поддержания нормального развития фитопланктона. В ряде случаев отмечается достоверная коррелятивная связь между содержанием органического азота и концентрацией хлорофилла (коэффициент корреляции составляет 0,67 [10]).

**Осень.** В этот период, особенно при резком понижении температуры, значительно уменьшается интенсивность фотосинтеза, усиливаются деструкционные процессы,



**Таблица 7**

**Содержание биогенных элементов в Рыбинском водохранилище в 2007-2008 гг.**

| Плес        | P <sub>общ</sub> | P <sub>мин</sub> | N <sub>общ</sub> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|
| лето        |                  |                  |                  |                              |                              |
| Волжский    | 0,086            | 0,034            | 1,16             | 0,12                         | 0,006                        |
| Моложский   | 0,063            | 0,034            | 1,00             | 0,033                        | 0                            |
| Шекснинский | 0,150            | 0,072            | 1,66             | 0,170                        | 0,014                        |
| Главный     | 0,050            | 0,016            | 0,93             | 0,07                         | 0,002                        |
| осень       |                  |                  |                  |                              |                              |
| Волжский    | 0,11             | 0,048            | 1,77             | 0,11                         | 0,001                        |
| Моложский   | 0,065            | 0,026            | 1,22             | 0,009                        | 0                            |
| Шекснинский | 0,24             | 0,11             | 2,05             | 0,16                         | 0,004                        |
| Главный     | 0,073            | 0,032            | 1,11             | 0,016                        | 0,001                        |

**Таблица 8. Содержание биогенных элементов в Шекснинском плесе в июле 2007 г.**

| Станция     | P <sub>общ</sub> | P <sub>мин</sub> | N <sub>общ</sub> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>2</sub> OH |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Устье Суды  | 0,066            | 0,021            | 1,23             | 0,004                        | 0,036                        | 0,001              |
| Любец       | 0,086            | 0,036            | 1,28             | 0,004                        | 0,038                        | 0,001              |
| Мякса       | 0,058            | 0,022            | 0,86             | 0                            | 0,022                        | 0                  |
| Кабачино    | 0,078            | 0,031            | 4,92             | 0                            | 0,055                        | 0                  |
| Ягорба      | -                | 0,014            | -                | 0                            | 0,023                        | 0,002              |
| Промсток    | 0,800            | 0,316            | 7,73             | 0,015                        | 0,515                        | 0,007              |
| Устье Кошты | 0,472            | 0,139            | 3,25             | 0,015                        | 0,151                        | 0,005              |
| Кошта (дно) | 0,409            | 0,147            | 7,63             | 0,138                        | 0,379                        | 0,006              |
| Кошта (пов) | 0,118            | 0,034            | 3,40             | 0,027                        | 0,222                        | 0,003              |
| Ваганиха    | 0,177            | 0,059            | 4,98             | 0,012                        | 0,135                        | 0,004              |
| Гаютино     | 0,420            | 0,292            | 4,92             | 0,023                        | 0,057                        | 0,030              |

что сопровождается выделением в воду ионов аммония, которые являются субстратом для нитрифицирующих бактерий. Поздней осенью после летнего минимума количество минеральных форм азота значительно возрастает и достигает своего максимума к концу зимы.

В среднем за год в исследованный период максимальное содержание азота свойственно Волжскому плесу; более 40 % азота приходится на минеральные формы, тогда как в остальных плесах их доля составляет около 30 %. Такие различия определяются тем, что воды волжского плеса формируются во-

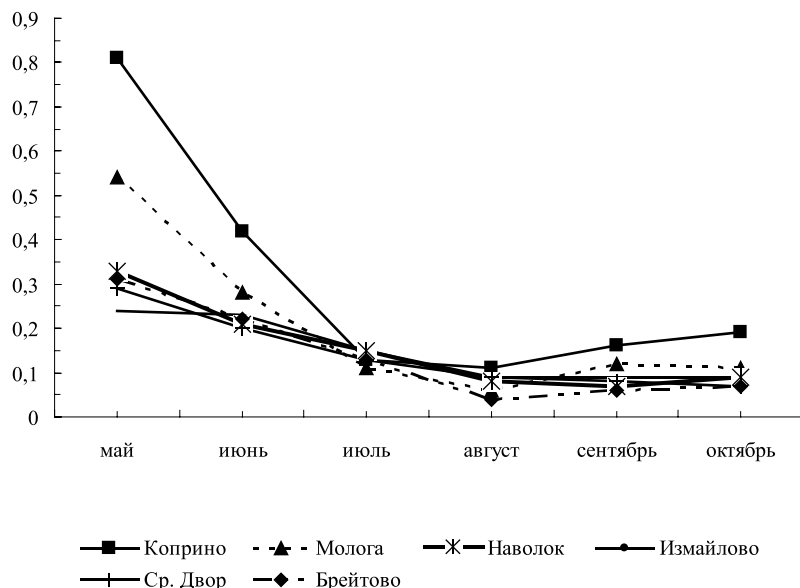
дами с территорий, которые более освоены в сельскохозяйственном отношении и менее болотисты и залесены, а также сточными водами крупного промышленного центра (г. Тверь).

Содержание общего азота за весь период исследования на стандартных станциях варьировало от 0,51 (ст. Измайлово в мае 2004 г.) до 3,62 (ст. Наволок в июне 2006 г.), составляя в среднем 1,02 мг/л. Основная доля его приходилась на органический. Среди минеральных форм преобладал аммонийный (в среднем по всей акватории за последние годы).

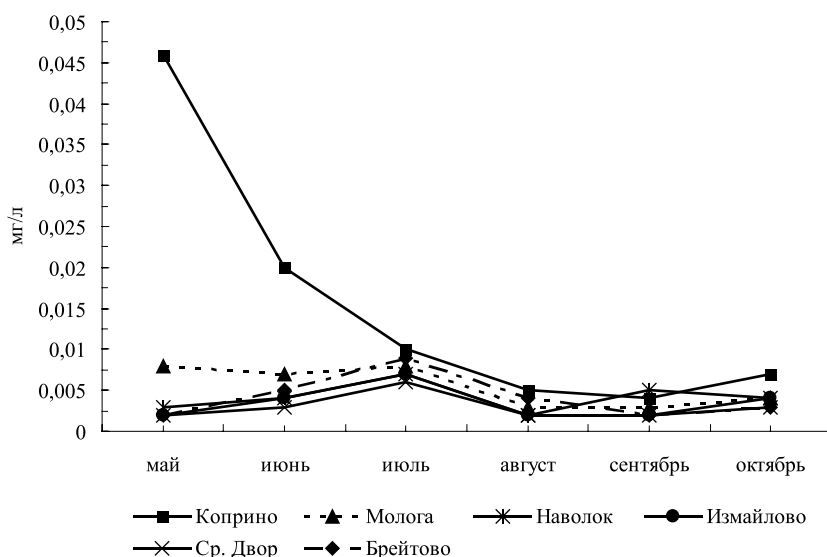
Ход сезонных изменений концентраций нитратов и нитритов в 2001-2008 гг. на стандартных станциях представлен на рис. 2, 3.

Количество гидроксилamina, важнейшего продукта нитрификационных и денитрификационных процессов, впервые определенное в течение нескольких лет подряд, варьировало в пределах 0-9 мкг/л (в среднем 1,7), свидетельствуя о низкой интенсивности соответствующих процессов и отсутствии загрязнения этим веществом.

Изучение Шекснинского плеса было проведено в 2007-2008 гг. Отмечено загрязнение неорганическими соединениями фосфора и азота верхней части Шекснинского плеса водохранилища. В реках Кошта и Ягорба зафиксированы повышенные концентрации биогенных элементов; содержание общего азота и общего фосфора в несколько раз превышало соответствующие величины, характерные не только для водохранилища в целом, но и Шекснинского плеса, куда непосредственно поступают воды этих рек (табл. 7, 8). Основная доля в общем содержании соединений азота и фосфора падает на органические формы. Экстремальные концентрации нитратного азота и фосфатов содержатся в промстоках, непосредственно сбрасываемых в р. Кошта. Наличие в ее придонных слоях нитритов, в несколько раз превышающих ПДК по этому компоненту, свидетельствует о развитых процессах нитрификации и, косвенно, о наличии высоких концентраций аммонийного азота. Все это создает неблагоприятные условия для жизнедеятельности планктонных организмов и рыбного населения в рассматриваемом районе. В нижней части Шекснинского плеса (ст. Ягорба 2, Мякса и Любец) уровень всех исследованных веществ был сходным с таковым в Центральном плесе. Высокое содержание биогенов в районе г. Череповец



**Рис. 2.** Сезонная динамика уровня нитратов на стандартных станциях Рыбинского водохранилища (мгN/л).



**Рис. 3.** Сезонная динамика уровня нитритов на стандартных станциях в Рыбинском водохранилище.

оказывает влияние на их содержание во всем Шекснинском плесе.

Исходный массив экспериментальных данных относится ко всему периоду открытой воды — от ранней весны до глубокой осени. Ясно, что значения измеренных параметров для разных гидрологических фаз в жизни водоема могут значительно различаться.

Помимо проведенного ретроспективного анализа полученных данных, мы ранее провели математическую обработку результатов

собственных анализов биогенов с использованием функции желательности (ФЖ) Харрингтона, позволяющей перейти к безразмерным величинам и оценивать результаты по единой шкале [18]. Целью работы было формирование универсальных таблиц для оценки уровня экологической безопасности содержания биогенных элементов и органического вещества в Рыбинском водохранилище на основе указанной функции. Рассчитаны диапазоны значений параметров, в которых экосистема Рыбинского водохранилища находилась в том или ином состоянии. В соответствии с пятиинтервальной психофизической шкалой Харрингтона составлены таблицы, которые дали возможность по результатам последующих измерений произвести оценку состояния экосистемы по биогенным элементам и органическому веществу. Отмечалось, что при оценках качества природных вод в первом приближении достаточно ориентироваться на предложенную нами трехинтервальную шкалу (табл. 9).

Литературные материалы практически не поддаются аналогичному анализу.

Выбранный таким образом оптимальный диапазон значений параметра позволяет наглядно отразить конкретную ситуацию в водоеме.

Отметим, что заметное количество экспериментальных данных попадает в разряд «низкое качество», что вряд ли можно принять за окончательный вывод. Поэтому следующим шагом в обсуждаемом направлении оценки состояния экосистем должен быть учет указанных гидрологических факторов. Для этого необходимо иметь большее количество экспериментальных данных для конкретных сезонов (отдельно весна, лето, осень, зима) с тем, чтобы избежать недостаточно обоснованных заключений о качестве воды природных водоемов на данный момент времени.

## Заключение

Показано, что исследования пространственного и сезонного распределений биогенных элементов указывают на переход Рыбинского водохранилища из разряда водоемов, лимитированных по азоту в начальный период заполнения, к середине 50-х годов 20-го столетия в водоемы, в которых фотосинтез лимитирован по фос-

Таблица 9

Дифференциальные нормы для содержания биогенных элементов на стандартных станциях  
Рыбинского водохранилища по трехинтервальной шкале.

| Лингвистическая<br>оценка качества | Интервалы<br>значений<br>ФЖ | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | N <sub>общ</sub>       | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | P <sub>общ</sub>           |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
|                                    |                             | Коприно                      |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | 0,08-0,40                    | 0,004-0,014                  | 0,06-0,14                    | 0,79-1,22              | 0,030-0,061                   | 0,040-0,073                |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | 0,02-0,08<br>0,40-0,45       | 0,002-0,004<br>0,014-0,016   | 0,04-0,06<br>0,14-0,15       | 0,70-0,79<br>1,22-1,32 | 0,025-0,035<br>0,061-0,068    | 0,030-0,040<br>0,073-0,083 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | <0,02<br>>0,52               | <0,002<br>>0,016             | <0,03<br>>0,15               | <0,7<br>>1,32          | <0,025<br>>0,068              | <0,030<br>>0,083           |
|                                    |                             | Молога                       |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | -                            | 0,002-0,008                  | 0,05-0,09                    | 0,71-1,20              | 0,013-0,038                   | 0,034-0,082                |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | -                            | 0,001-0,002<br>0,008-0,009   | 0,04-0,05<br>0,09-0,10       | 0,59-0,71<br>1,20-1,30 | 0,007-0,013<br>0,038-0,043    | 0,024-0,034<br>0,082-0,090 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | -                            | <0,001<br>>0,009             | <0,04<br>>0,10               | <0,59<br>>1,30         | <0,007<br>>0,043              | <0,024<br>>0,90            |
|                                    |                             | Наволоч                      |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | 0,052-0,220                  | 0,001-0,007                  | 0,04-0,08                    | 0,48-1,38              | 0,008-0,023                   | 0,022-0,060                |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | 0,020-0,052<br>0,220-0,250   | 0-0,001<br>0,007-0,008       | 0,03-0,04<br>0,08-0,09       | 0,34-0,48<br>1,38-1,47 | 0,005-0,008<br>0,023-0,026    | 0,029-0,034<br>0,060-0,068 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | <0,020<br>>0,250             | >0,009                       | <0,03<br>>0,09               | <0,34<br>>1,47         | <0,005<br>>0,026              | <0,029<br>>0,068           |
|                                    |                             | Измайлово                    |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | 0,084-0,190                  | 0,002-0,006                  | 0,04-0,07                    | 0,71-1,02              | 0,009-0,018                   | 0,038-0,058                |
|                                    |                             | 0,060-0,084<br>0,19-0,022    | 0,001-0,007                  | 0,03-0,08<br>0,08-0,09       | 0,64-0,71<br>1,02-1,18 | 0,006-0,009<br>0,018-0,020    | 0,031-0,038<br>0,059-0,062 |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | 0,030-0,060<br>0,022-0,024   | 0-0,001<br>0,007-0,008       | 0,02-0,03<br>0,09-0,10       | 0,54-0,64<br>1,18-1,25 | 0,004-0,006<br>0,020-0,022    | 0,028-0,031<br>0,062-0,068 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | 0,005-0,030<br>0,240-0,280   | 0,008-0,009                  | 0,01-0,02<br>0,10-0,11       | 0,45-0,54<br>1,25-1,35 | 0-0,004<br>0,022-0,025        | 0,020-0,028<br>0,068-0,072 |
|                                    |                             | <0,005<br>>0,280             | >0,009                       | <0,01<br>>0,11               | <0,45<br>>1,35         | >0,025                        | <0,020<br>>0,072           |
|                                    |                             | Средний Двор                 |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | 0,070-0,18                   | 0,002-0,006                  | 0,05-0,07                    | 0,71-1,12              | 0,010-0,018                   | 0,037-0,061                |
|                                    |                             | 0,050-0,070<br>0,180-0,210   | 0,001-0,002<br>0,006-0,007   | 0,04-0,05<br>0,07-0,08       | 0,62-0,71<br>1,12-1,20 | 0,008-0,010<br>0,018-0,021    | 0,032-0,037<br>0,061-0,067 |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | 0,016-0,050<br>0,210-0,240   | 0-0,001<br>0,007-0,008       | 0,03-0,04<br>0,08-0,09       | 0,50-0,62<br>1,20-1,32 | 0,005-0,008<br>0,021-0,023    | 0,024-0,032<br>0,067-0,075 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | 0-0,016<br>0,240-0,270       | 0,008-0,009                  | 0,02-0,03<br>0,09-0,10       | 0,38-0,50<br>1,32-1,50 | 0,003-0,005<br>0,023-0,025    | 0,020-0,024<br>0,075-0,080 |
|                                    |                             | >0,270                       | >0,009                       | <0,02<br>>0,10               | <0,38<br>>1,50         | <0,003<br>>0,025              | <0,020<br>>0,024           |
|                                    |                             | Брейтово                     |                              |                              |                        |                               |                            |
| хорошее                            | 1-0,63                      | 0,063-0,170                  | 0,003-0,007                  | 0,05-0,07                    | 0,81-1,08              | 0,010-0,022                   | 0,044-0,060                |
|                                    |                             | 0,041-0,063<br>0,170-0,190   | 0,002-0,003<br>0,007-0,008   | 0,04-0,05<br>0,07-0,08       | 0,73-0,81<br>1,08-1,14 | 0,008-0,010<br>0,022-0,024    | 0,040-0,044<br>0,060-0,065 |
| среднее                            | 0,63-0,37                   | 0,002-0,041<br>0,190-0,210   | 0,001-0,002<br>0,008-0,009   | 0,03-0,04<br>0,08-0,09       | 0,66-0,73<br>1,14-1,22 | 0,004-0,008<br>0,024-0,028    | 0,034-0,040<br>0,065-0,070 |
| низкое                             | 0,37-0,0                    | 0-0,002<br>0,210-0,260       | 0-0,001<br>0,009-0,010       | 0,02-0,03<br>0,09-0,10       | 0,58-0,66<br>1,22-1,30 | 0,002-0,004<br>0,028-0,032    | 0,029-0,034<br>0,070-0,076 |
|                                    |                             | >0,260                       | >0,010                       | <0,02<br>>0,10               | <0,58<br>>1,30         | <0,002<br>>0,032              | <0,029<br>>0,076           |

фору. Это обстоятельство может служить свидетельством практического завершения разложения лабильной фракции органического вещества затопленной растительности и стабилизации состояния водоема.

Болотное питание притоков Моложского и Шекснинского плесов определяет относительно высокое содержание в них аммонийной формы азота.

Процессы нитрификации, особенно развитые в зимний период, играют ключевую роль в поддержании максимальной концентрации нитратов в весенних водах Волжского и Центрального плесов.

В Волжском плесе концентрация биогенных элементов в течение почти всех сезонов года значительно выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья северных рек Молога и Шексна, площадь водосбора которых характеризуется большей залесенностью и заболоченностью почв, меньшей сельскохозяйственной освоенностью. На режим биогенных элементов в этой части водоема также большое влияние оказывают сточные воды г. Тверь.

В реках Кошта и Ягорба, формирующих биогенный режим верхней части Шекснинского плеса водохранилища, зафиксированы существенно повышенные концентрации как неорганических форм биогенных элементов, так и общего их содержания. Экстремальные концентрации нитратного азота и фосфатов содержатся в промстоках, непосредственно сбрасываемых в р. Кошта. Все это создает неблагоприятные условия для жизнедеятельности планктонных организмов и рыбного населения в рассматриваемом районе.

Подтверждены некоторые общие закономерности, характерные для всего водоема: максимальные концентрации общего и минимальные минерального азота характерны для летнего времени; основной формой этого элемента являлась органическая, составляющая от 68 до 98 % общей.

Количество гидроксиламина, важнейшего промежуточного продукта нитрификационных и денитрификационных процессов, впервые определенное в течение нескольких лет подряд, свидетельствует о низкой интенсивности соответствующих процессов и отсутствии прямого загрязнения этим весьма токсичным химическим соединением.

**Ключевые слова:** азот, фосфор, Рыбинское водохранилище

Для всех плесов водохранилища составлены таблицы в трехинтервальной психофизической шкале, которые дают возможность по результатам последующих измерений произвести оценку современного состояния экосистемы по биогенным элементам и органическому веществу.

Распределение и особенности динамики соединений азота и фосфора в различных частях водохранилища находятся в прямой зависимости от динамики водных масс, которая, в свою очередь, обусловлена морфометрией водоема и гидрологическими условиями. Определяющее значение также имеет степень освоенности различных площадей водосбора.

Сравнение полученных нами данных с результатами других исследователей за 70-80-е годы 20-го века показывает, что все сезонные вариации в концентрациях соединений азота и фосфора находятся в пределах их естественных колебаний, свидетельствуя о стабилизации режима биогенных элементов в Рыбинском водохранилище.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00593*

### *Литература*

1. Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: «Наука». 1972. 364 с.
2. Щербаков А.П. Гидрохимический режим Волги, Мологи, Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища). Труды биологической станции «Борок». Л.: Изд-во АН СССР. 1950. Вып. 1. С. 7-34.
3. Кудрявцев Д.Д. Материалы к гидрохимической характеристике Волжского отрога Рыбинского водохранилища в 1943-1946 г.г. Труды биологической станции «Борок». Л.: Изд-во АН СССР. 1950. Вып. 1. С. 35-79.
4. Кудрявцев Д.Д. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского. Труды биологической станции «Борок». Л.: Изд-во АН СССР. 1950. Вып.1. С. 79-96.
5. Воронков П.П. Основные черты формирования гидрохимического режима Рыбинского водохранилища. Труды ГГИ. Л.: гидрометеорологическое изд-во. 1951. Вып. 2. С. 167-238.
6. Воронков П.П. Основные черты режима биогенных соединений водохранилищ Волжской системы в связи с их первичной продукцией. Труды

ГГИ. Л.: гидрометеорологическое изд-во. 1953. Вып. 37. С. 34-61.

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 биол. станции «Борок». Л.: Изд-во АН СССР. 1955. Вып. 2. С. 335-350.

9. Трифонова Н.А. Распределение соединений азота в Рыбинском водохранилище в зимне-весенний период. В кн. Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Л.: Наука. 1971. С. 101-113.

10. Трифонова Н.А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище. Автореферат канд. дисс. Москва. 1974. 28 с.

11. Волга и ее жизнь. Л.: Наука. 1978. 349 с.

12. Драчев С.М. Антропогенный фактор формирования качества воды и режима биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги / С.М. Драчев, А.А. Былинкина, Л.А. Калинина // Волга-1. Проблемы изучения рационального использования биологических ресурсов водоемов. Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во. 1971. С. 28-32.

13. Драчев С.М. Влияние антропогенных факторов на содержание биогенных элементов и солевой состав водохранилищ Волги / С.М. Драчев, А.А. Былинкина, Н.А. Трифонова, Н.А. Кудрявцева // Биологические продукционные процессы в бассейне Волги. Л.: «Наука». 1976. С. 18-24.

14. Разгулин С.М. Сезонная динамика и баланс биогенных элементов в Рыбинском водохранилище / С.М. Разгулин, М.В. Гапеева, А.С. Литвинов // Географические аспекты рационального природопользования в Верхневолжском Нечерноземье. Ярославль: типография политехнического института. 1984. С. 71-76.

15. Разгулин С.М. Баланс биогенных элементов и ионов в Рыбинском водохранилище в 1980 году / С.М. Разгулин, М.В. Гапеева, А.С. Литвинов // В кн: Гидрохимические исследования волжских водохранилищ. Рыбинск: типография №2. 1982. С. 81–90.

16. Разгулин С.М. Динамика основных ионов Рыбинского водохранилища в 1978- 1979 гг. / С.М. Разгулин, М.В. Гапеева // Инф. бюллетень «Биология внутренних вод». 1983. № 58. С. 50-53.

17. Былинкина А.А. Содержание азота и фосфора в воде Рыбинского водохранилища в период автотрофной стадии его функционирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. 1993. С. 28-41.

18. Бикбулатов Э.С. Функции желательности Харрингтона для оценки качества природных вод / Э.С. Бикбулатов, И.Э. Степанова // Экологическая химия. С-Пб.: ООО Теза. 2011. Т. 20. № 2.. С. 94-108.



I.E. Stepanova, E.S. Bikbulatov, E.M. Bikbulatova

## DYNAMIC REGULARITIES OF BIOGENIC ELEMENT CONTENT IN WATER OF RYBINSKOERESERVOIROVER THE YEARS OF ITS EXISTENCE

The analysis of interannual and seasonal regularities of content changes of main biogenic elements in water of Rybinskoe reservoir over the years of its existence based on literature data and monitoring of many years was carried out. It was found out that nitrogen and phosphorus distribution and variation in different parts of reservoir directly depend on water dynamics which correlates with morphometry of the reservoir and hydrological conditions.

The data obtained over the last 40 years show stabilization of biogenic element behavior in Rybinskoe reservoir because seasonal changes of concentrations of nitrogen and phosphorus compounds are in within natural variation.

**Key words:** nitrogen, phosphorus, Rybinskoe reservoir.