

УДК: 556.5:546.21

## КАЧЕСТВО ВОДЫ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА: РЕЖИМ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА\*

© 2016 г. И.Э. Степанова

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

**Ключевые слова:** качество воды, гидрохимический режим, растворенные газы, внутренние водоемы, Рыбинское водохранилище, растворенный кислород, процент насыщения.

Изучено содержание растворенного кислорода и степень насыщения им воды на стандартных станциях Рыбинского водохранилища в поверхностном и придонном слоях в 2011–2015 гг. методом Винклера. Определены сезонные и межгодовые вариации в концентрациях кислорода в водоеме. Выявлено, что более мелководные станции Центрального плеса в летний период редко подвержены кислородной стратификации и она гораздо менее выражена, чем на глубоководных. Произведено сравнение полученных новых данных по содержанию растворенного кислорода с предыдущими периодами. Отмечено, что за последние годы в кислородном режиме водохранилища не произошло каких-либо серьезных изменений. Концентрация растворенного кислорода в водохранилище в исследованный период редко достигала полного насыщения. Оценена степень обеспеченности гидробионтов растворенным кислородом в водоеме в настоящее время. Показано, что в период температурной и кислородной стратификации его уровень в придонных слоях снижается до значений, опасных для жизнедеятельности гидробионтов.



И. Э. Степанова

Рыбинское водохранилище – крупнейший искусственный водоем, площадь которого и общий объем при НПУ равны соответственно 4550 км<sup>2</sup> и 25,4 км<sup>3</sup>. Водоем мелководный (средняя глубина при НПУ – 5,6 м). В водном питании основная роль принадлежит крупным рекам – Волге, Мологе, Шексне, которые дают около 2/3 общего притока водохранилища.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00346

Содержание основных растворенных газов (азота, кислорода, углекислого газа, метана, водорода) в водоеме в целом характеризует его газовый режим и имеет немаловажное значение для оценки его экологического и санитарного состояния. Уровень растворенного кислорода является одной из наиболее важных характеристик качества воды в водоемах, т. к. служит интегральным показателем происходящих в водоеме процессов – продукционно-деструкционных и динамических. Концентрация кислорода в водоеме должна быть достаточной для обеспечения дыхания всех гидробионтов и для процессов самоочищения, в которых он непосредственно участвует, окисляя органические вещества отмерших организмов.

Режим кислорода в Рыбинском водохранилище формируется под воздействием множества факторов: гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических. Наиболее значимым является тесный контакт воды и атмосферы в летнее время, длительный подледный период [1], перенос кислорода в результате ветрового перемешивания, а также необходимость окисления большой массы органического вещества аллохтонного и автотонного происхождения, процесс которого фотосинтезом компенсируется не полностью. Последние сведения о содержании растворенного кислорода в Рыбинском водохранилище относятся к 1980-м годам и представлены только в материалах Гидрометслужбы и данных лабораторий гидрологии и гидрохимии, альгологии ИБВВ РАН [2, 3]. С 1990 по 2010 гг. данные об уровне растворенного кислорода в Рыбинском водохранилище отсутствуют.

Цель исследования – изучение и оценка состояния пространственного, межгодового и сезонного кислородного режима Рыбинского водохранилища и уровня обеспеченности растворенным кислородом придонных гидробионтов (рыб, некоторых моллюсков и ракообразных) на современном этапе, а также сравнение полученных данных с более ранними периодами существования водоема.

По распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водоеме выделено четыре плеса: Волжский, Моложский, Шекснинский и Центральный. Первые три расположены по долинам соответствующих рек, последний представляет воды основной части водохранилища. Уровень кислорода определяли на поверхности и у дна по методу Винклера [4] в период с 2010 по 2015 гг. на шести стандартных станциях, расположенных на Волжском и Центральном плесах Рыбинского водохранилища (табл. 1). Схема отбора проб представлена на рис. 1.

Таблица 1. Станции отбора проб

Номер станции	Название станции	Местоположение станции	Глубина, м
1	Коприно	Узкая часть Волжского плеса водохранилища на бывшем русле Волги	12–14
2	Молога	Южная часть основной акватории в Волжском плесе на бывшем русле р. Мологи у впадения ее в Волгу	до 18
3	Наволоок	Центр Главного (Центрального) плеса	7–8
4	Измайлово	Восточная часть Центрального плеса на бывшей пойме р. Шексны	5–6
5	Средний Двор	Северная и северо-восточная части Центрального плеса	13–14
6	Брейтово	Бывшее русло р. Мологи в западной части водохранилища (Центральный плес)	13–15

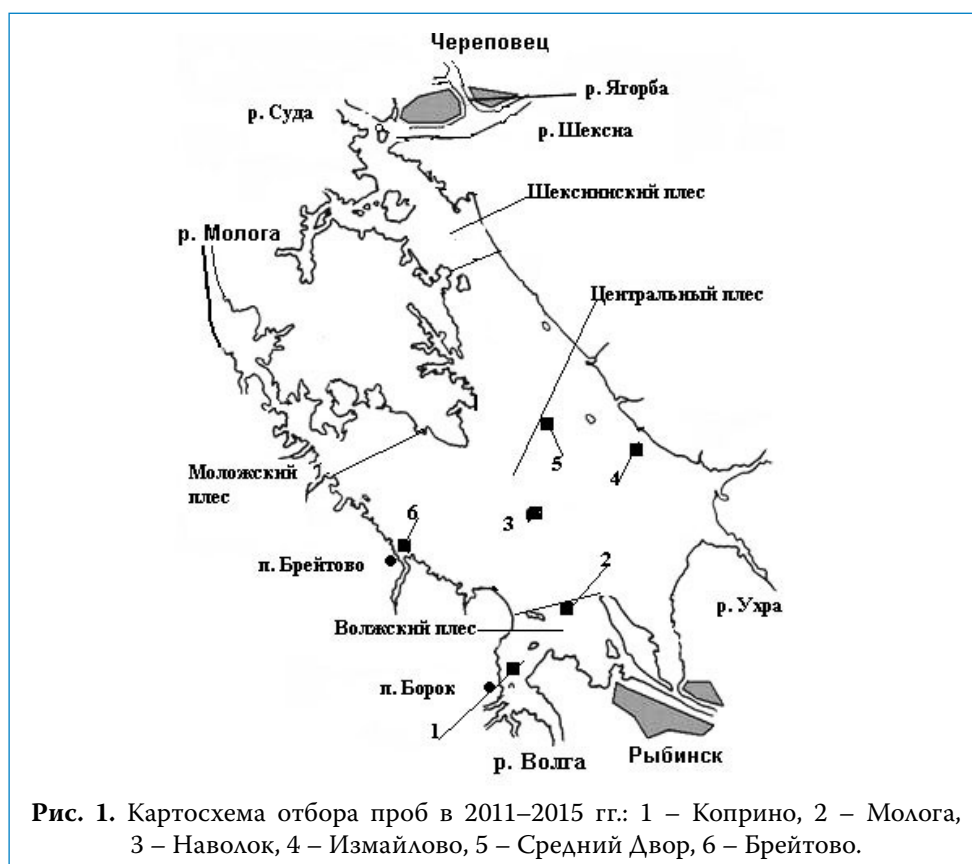


Рис. 1. Картограмма отбора проб в 2011–2015 гг.: 1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Наволоок, 4 – Измайлово, 5 – Средний Двор, 6 – Брейтово.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация растворенного кислорода в водохранилище в исследованный период редко достигала полного насыщения, но оставалась в основном достаточно благоприятной для развития и жизнедеятельности водных организмов. За это время не наблюдалось его полного исчезновения в придонных слоях даже при наиболее выраженной на некоторых станциях термической стратификации, которая в Рыбинском, да и в других равнинных водохранилищах такого типа [5], является нечастой. В летний период дефицит кислорода в среднем для водоема не характерен, т. к. мелководность и большая площадь, а также высокая ветровая активность в зоне его расположения и течения способствуют интенсивному перемешиванию водной массы по вертикали и энергичной аэрации всех слоев воды. В зимний период установлению температурной и кислородной стратификации может препятствовать усиленная сработка водохранилища.

В исследуемый период отмечено следующее распределение кислорода по сезонам года: ранней зимой концентрация кислорода по всей толще воды составляла 11–13 мг/л, в летнее время 6–9 мг/л, поздней осенью 10–12 мг/л, в конце зимы – начале весны вновь падала до 7–10 мг/л, повышалась в мае в период половодья до 9–11 мг/л, что отражено и в более ранних исследованиях [1] (табл. 2).

**Таблица 2.** Содержание растворенного кислорода и процентное насыщение воды по результатам наблюдений Рыбинской Гидрометеобсерватории на постах наблюдения за контролем качества воды (усредненные данные за 1950–1965 гг.)

Станция	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Пос. Мышкино	<u>9,84</u>	<u>10,79</u>	<u>7,75</u>	<u>10,36</u>	<u>9,68</u>
	68	93	87	82	82
Разрез Брейтово– Измайлово, ст. 2	<u>9,67</u>	<u>11,03</u>	<u>8,74</u>	<u>12,03</u>	<u>10,32</u>
	68	93	87	100	87
Разрез Брейтово– Измайлово, ст. 3	<u>10,30</u>	<u>11,24</u>	<u>8,63</u>	<u>11,68</u>	<u>10,26</u>
	71	99	88	95	88
Разрез Брейтово – Измайлово, ст. 4	<u>12,13</u>	<u>11,70</u>	<u>8,61</u>	<u>11,86</u>	<u>10,32</u>
	85	97	88	95	91
Мыс Рожновский	<u>10,39</u>	<u>11,25</u>	<u>9,14</u>	<u>11,21</u>	<u>10,52</u>
	75	94	92	90	88
Пос. Переборы	<u>6,98</u>	<u>10,88</u>	<u>8,29</u>	<u>11,60</u>	<u>9,44</u>
	73	90	83	92	84
В среднем по водоему	<u>10,47</u>	<u>11,20</u>	<u>8,57</u>	<u>11,46</u>	<u>10,22</u>
	73	94	88	92	87

*Примечание:* станции отбора проб на постах наблюдения ГМС отличаются от стандартных станций ИБВВ РАН, к Волжскому плесу относится станция у пос. Мышкино, остальные к Центральному; в числителе – содержание растворенного кислорода, мг/л; знаменателе – процентное насыщение воды, %.

В придонном слое в летнее время в результате температурного скачка уровень кислорода снижался до 1–4 мг/л, тогда как в трофогенном слое в некоторых случаях отмечено его увеличение за счет усиления процессов фотосинтеза до 10–11 мг/л. Наблюдалась также перенасыщенность этим газом на всех стандартных станциях водоема, которая достигала 110–135 % от полного насыщения (20 июля 2011 г., 1 августа 2012 г., 4 июня 2013 г.). Избыточное количество кислорода впоследствии частично компенсируется в процессе его выделения в атмосферу. В первые годы после заполнения Рыбинского водохранилища зафиксировано даже неоднократное 200 % насыщение [6]. Такое сезонное распределение содержания кислорода является типичным для всех водохранилищ бассейна Верхней Волги: Ивановского, Угличского, Горьковского [3, 5, 7].

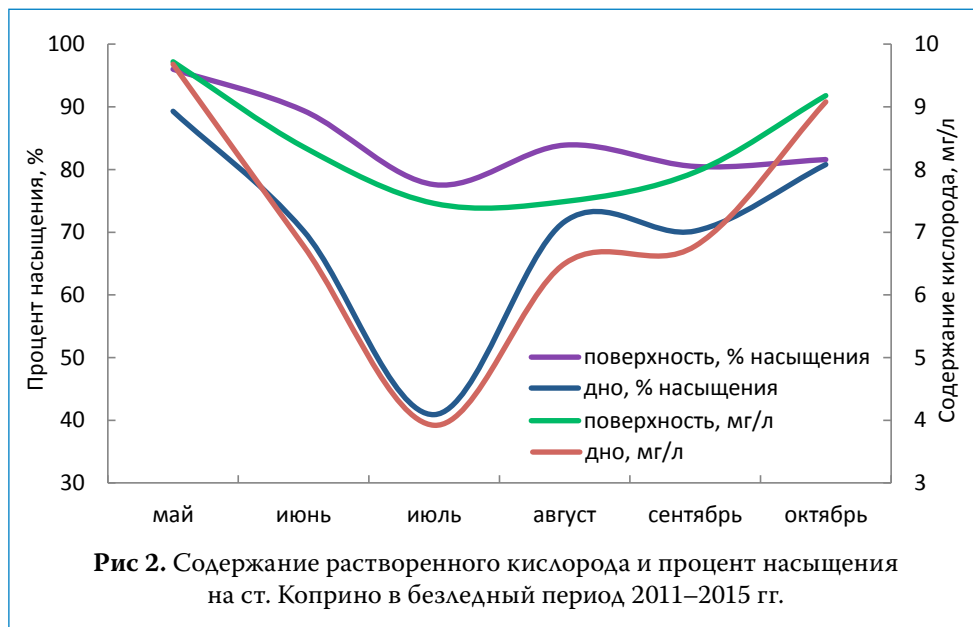
Как результат непрерывных широкомасштабных процессов окисления автохтонной и аллохтонной органики, растворенных газов и других восстановленных соединений, которые почти постоянно поступают из донных отложений, в целом для поверхностного слоя воды характерна недонасыщенность кислородом на 12–20 %. В среднем для всех стандартных станций за безледный период она составила в поверхностном слое 13,7 %, придонном – 18,4 %, В верхнем слое воды уровень  $O_2$  был практически одинаковым на всех исследованных станциях. Однако наименьшее содержание кислорода отмечено на ст. Коприно – в среднем за безледный период 8,00 мг/л, там же зафиксировано его минимальное значение 5,49 мг/л в июле 2013 г. (табл. 3).

**Таблица 3.** Содержание кислорода и процентное насыщение на станциях в безледный период, 2011–2015 гг.

Станция	Поверхностный слой		Придонный слой	
	$O_2$ , мг/л	% насыщения	$O_2$ , мг/л	% насыщения
Коприно	8,00	79,4	6,68	65,0
Молога	8,40	86,3	6,63	68,2
Наволоок	8,61	85,2	7,83	80,5
Измайлово	8,66	90,3	8,10	82,0
Средний Двор	8,80	92,1	6,74	67,2
Брейтово	8,80	90,7	6,57	66,4

Меньшие концентрации растворенного кислорода на станциях Коприно и Молога по сравнению с другими участками водохранилища отмечались и в 1980–1990 гг. В Волжском плесе за период открытой воды содержание растворенного кислорода в среднем за десять лет составило 8,7 мг/л, тогда как в Центральном – 9,4 мг/л [3].

Летний минимум содержания кислорода в водоеме обусловлен довольно слабой аэрацией, усиленной деструкцией органического вещества при повышенных температурах, дыханием фитопланктона и зоопланктона. В это время фотосинтез чаще всего недостаточен для компенсации его потребления и для достижения весеннего или осеннего уровня. В целом в период открытой воды по сравнению со станциями Центрального плеса Волжский плес (особенно ст. Коприно) был наименее обеспечен кислородом в поверхностных слоях (табл. 3, рис. 2).



Сезонный цикл изменений уровня растворенного кислорода определяется не только процессами образования и распада органического вещества, но зачастую и физическим переносом кислорода от поверхности в более глубокие слои. Скорость переноса может быть ограничена температурной стратификацией. Зимой при небольшой продуктивности и относительно высокой турбулентности вод на ст. Коприно и Молога наблюдалось однородное вертикальное распределение растворенного кислорода (как результат хорошего перемешивания), а на ст. Измайлово и Средний Двор отмечены небольшие различия между содержанием кислорода на поверхности и у дна (2–3 мг).

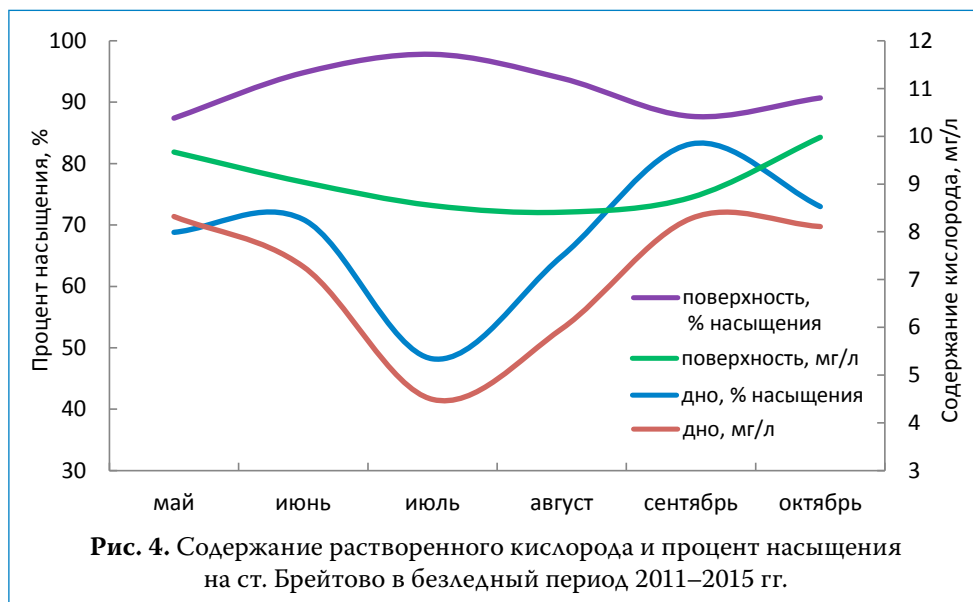
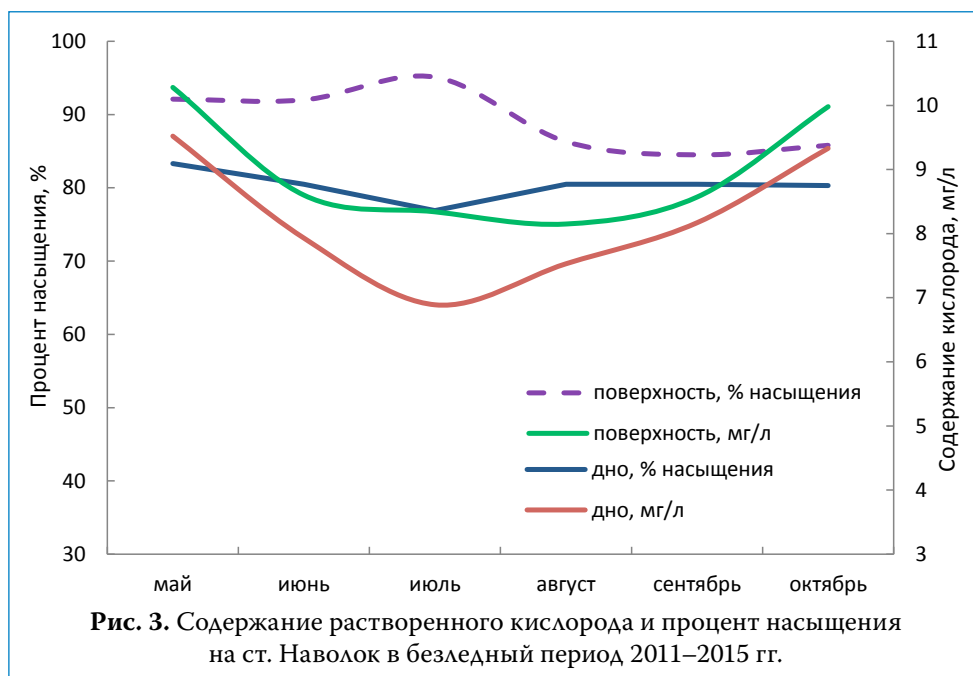
В периоды температурной стратификации, как правило, фактически не существует обмена биогенных элементов между эпи- и гипolimнионом, т. к. термоклин довольно стабилен. В это время происходит усиленное потребление растворенного кислорода при аэробном окислении разла-

гающихся органических веществ в гипolimнионе, его концентрация там начинает быстро снижаться, приводя к стратификации водоема по кислороду, которая в летнее время в исследуемый период была выражена в отдельные годы на некоторых станциях достаточно резко, несмотря на то, что в основном погодные условия способствовали вертикальному перемешиванию. В штилевую погоду в июле-августе при активизации деструкционных процессов под воздействием повышенных температур и при полном отсутствии перемешивания расход кислорода у дна иногда отмечался настолько значительным, что насыщение воды кислородом интенсивно снижалось до 20–40 %, минимальное содержание кислорода и минимальный процент насыщения отмечены в Волжском плесе в начале июля 2013 г. На более продуктивных станциях Молога и Коприно разложение большого количества водорослей требовало большего количества растворенного кислорода, минимальные концентрации и процент насыщения составили 0,90 мг/л и 9,7 %, 0,64 мг/л и 6,9 % соответственно. Случаи столь сильного обеднения насыщения глубинных слоев воды кислородом довольно редки и развиты локально, стратификация устанавливается лишь ненадолго, т. к. в водохранилище наблюдается частое ветровое перемешивание, поэтому можно считать, что в целом в настоящее время летнее насыщение кислородом является вполне достаточным для нормального функционирования водных организмов. Однако в 2011 г. уровень кислорода у дна на ст. Коприно, Молога, Средний Двор, Брейтово был ниже 4 мг/л в течение двух сроков наблюдения (5 и 19 июля), что могло составить угрозу для жизнедеятельности придонных гидробионтов.

В поверхностном горизонте в среднем за исследуемый период насыщение на всех стандартных станциях 87,3, в придонном – 71,6 %, Центральная часть водохранилища (ст. Наволок и Измайлово) характеризовалась небольшой стратификацией по кислороду, при которой разница его уровней между поверхностными и придонными слоями не превышала даже в летнее время 2,5 мг/л (рис. 3). Причиной этого является более интенсивное ветровое перемешивание всей водной толщи за счет больших разгонов и небольших глубин на вышеуказанных станциях.

На ст. Брейтово отмечено самое высокое содержание и степень насыщения кислородом в поверхностном слое (табл. 2, рис. 4) и самое большое различие в содержании кислорода между поверхностными и придонными слоями – в среднем за исследуемый период 2,23 мг/л.

На ст. Средний Двор также концентрации растворенного кислорода в среднем были довольно высокие, часто наблюдалась температурная и кислородная стратификация, разница между содержанием кислорода в поверхностном и придонном слоях достигала в летнее время 8,4 мг/л.



Весной и осенью стратификация по кислороду на всех станциях была очень слабая, не более 1–2 мг/л. В начале зимы водоем замерзает, прекращается поступление растворенного кислорода с поверхности, происходит



резкое снижение его концентрации в глубинных слоях. В это же время его образование в поверхностном слое продолжается, что приводит к тому, что концентрация растворенного кислорода в эпилимнионе достигает максимума на 5–15 сутки после образования льда [8]. В декабре 2014 г. на станциях Коприно и Молога отмечены высокие концентрации растворенного кислорода – 13,6 и 12,5 мг/л в поверхностных слоях, 11,3 и 10,1 мг/л в придонных. Дефицит кислорода зимой наблюдался локально, преимущественно в придонных слоях и не каждую зиму: в исследуемый период 2011–2015 гг. в немногочисленных зимних пробах он не отмечался. В 1948–1957 гг. при низких концентрациях кислорода в зимний период в Моложском плесе зафиксированы заморные явления (в 1950 г. произошла гибель судака). Минимальные количества растворенного кислорода (ниже 1 мг/л) наблюдались в 5 из 10 исследованных лет [9].

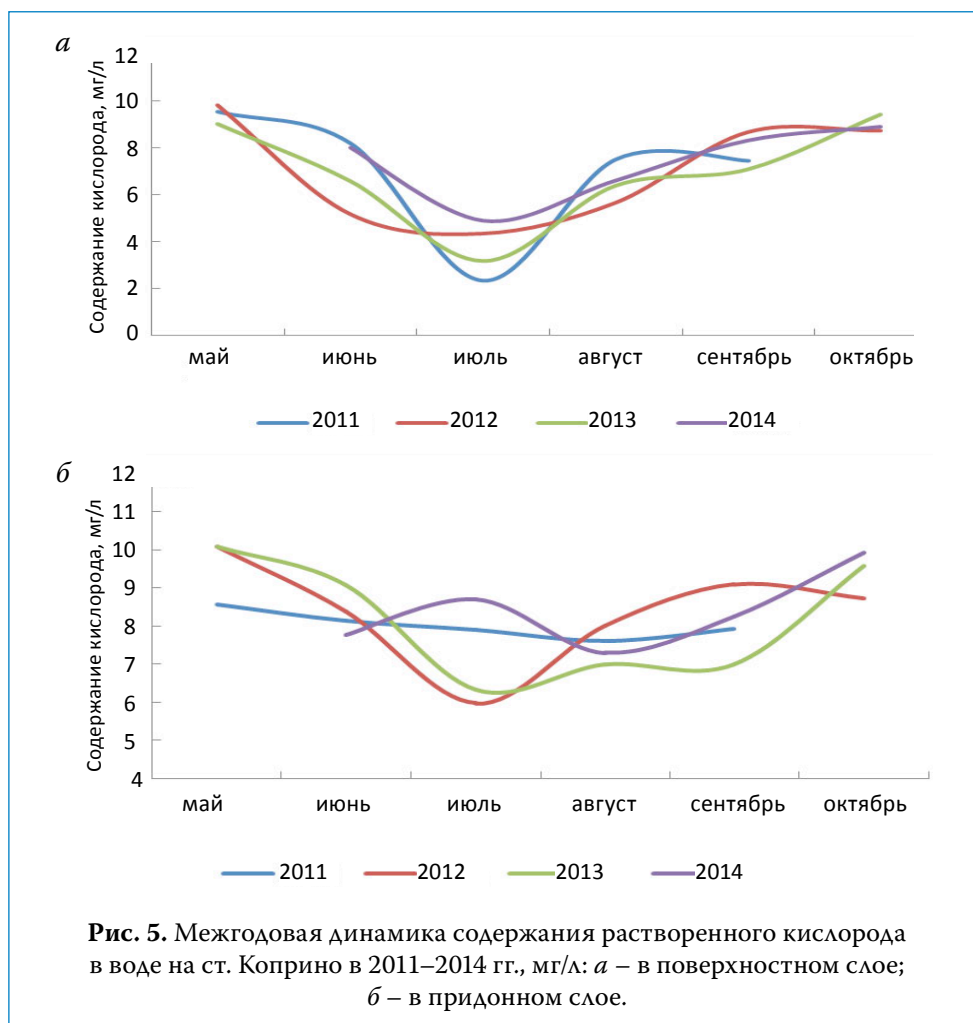
При анализе межгодовых различий сезонной динамики растворенного кислорода следует отметить, что минимальные значения в поверхностном слое отмечены в июле во все исследуемые годы, кроме 2014 г., с максимальным для этого месяца и летнего сезона значением (рис. 5а).

В придонном слое минимальный уровень растворенного кислорода также отмечен в июле, однако в 2014 г. он был выше, чем в другие периоды (рис. 5б). Следует отметить, что 2014 г. отличался маловодностью – годовой объем водного стока составил 17,4 км<sup>3</sup>, что в два раза меньше среднемноголетнего.

**Таблица 4.** Уровень кислорода и процент насыщения кислородом по усредненным данным постов наблюдения за качеством воды в Рыбинском водохранилище в безледный период, 1984–1985 гг. [3]

Плес	Поверхность		Дно	
	Уровень кислорода, мг/л	Насыщение кислородом, %	Уровень кислорода, мг/л	Насыщение кислородом, %
Волжский	8,76	85	7,82	75
Моложский	8,89	91	8,51	86
Шекснинский	11,28	78	10,9	76
Центральный	9,27	90	8,63	81
Среднее	9,55	86	8,96	80

Табл. 4 составлена по литературным данным (Рыбинской ГМО были изучены все 4 плеса водохранилища), в табл. 5 представлены современные данные по стандартным станциям, которые относятся только к двум плесам.



**Таблица 5.** Уровень кислорода и процент насыщения кислородом в Рыбинском водохранилище в безледный период, 2011–2015 гг.

Плес	Поверхность		Дно	
	Уровень кислорода, мг/л	Насыщение кислородом, %	Уровень кислорода, мг/л	Насыщение кислородом, %
Волжский	8,20	83	6,65	66,6
Центральный	8,72	90	7,31	75,3

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из полученных данных по содержанию растворенного кислорода в Рыбинском водохранилище за 2011–2015 гг. и их сравнения с более ранними сведениями, можно сделать вывод о том, что в кислородном режиме водоема за последние двадцать лет не произошло каких-либо значительных изменений. В исследуемый период отмечено следующее распределение кислорода по сезонам года: в начале зимы концентрация кислорода по всей толще воды составляла от 11 до 13 мг/л, в безледный период от 6 до 9 мг/л, поздней осенью от 10 до 12 мг/л, в конце зимы – начале весны вновь падала до 7–10 мг/л и повышалась в мае в период половодья до 9–11 мг/л. Такое сезонное распределение содержания кислорода характерно и для других водохранилищ Верхней Волги. В результате проведенных анализов выявлено, что на более мелководных станциях Центрального плеса в летний период реже наблюдается кислородная стратификация и она менее выражена, чем на глубоководных.

Придонные водные организмы (рыбы и некоторые моллюски) в среднем достаточно обеспечены растворенным кислородом для нормальной жизнедеятельности, однако бывают случаи, когда содержание кислорода в придонных слоях снижается до минимальных значений, в результате чего может произойти угнетение жизнедеятельности и даже гибель гидробионтов.

При сравнении полученных в рамках данного исследования и более ранних данных отмечено, что в поверхностном слое в вегетационный период концентрация растворенного кислорода и процентное насыщение воды кислородом остались на прежнем уровне, а в придонном слое – несколько снизились. Полученные в 2011–2015 гг. современные данные восполняют пробел отслеживания динамики содержания растворенного кислорода и могут использоваться для прогнозирования состояния Рыбинского водохранилища.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбинское водохранилище и его жизнь / под ред. Б.С. Кузина. Л.: Наука, 1972. 364 с.
2. Корнева А.Г. Фитопланктон Рыбинского водохранилища: состав, особенности распределения, последствия эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. Тр. ИБВВ РАН. 1993. Вып. 67(70). СПб.: Гидрометеиздат. С. 50–114.
3. Былинкина А.А. Гидрохимическая характеристика // Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: ЯГТУ, 2001. 428 с.
4. Семенов А.Д. Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 540 с.

5. Драчев С.М., Буторин Н.В., Былинкина А.А. Факторы, определяющие качество воды в водохранилищах // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Тр. ИБВВ АН СССР. 1974. Вып. 26(29). Л.: Наука. С. 3–18.
6. Алекин О.А. Основы гидрохимии / под ред. С.В. Бруевича. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
7. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги / под ред. З.А. Викулиной и В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
8. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования / под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 278 с.
9. Аничкова Н.И. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища // Тр. Дарвинского заповедника. 1959. Вып. 5. С. 191–209.

**Сведения об авторе:**

Степанова Ирина Эрнстовна, научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод Российской академии наук», Россия, 152742, пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский район; e-mail: iris@ibiw.yaroslavl.ru