

ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ВОДОХРАНИЛИЩАХ СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГИ

© 2023 г. Н. М. Минеева^а, *, А. И. Цветков^а

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
Россия 152742 Ярославская обл., Некоузский р-он, пос. Борок

*e-mail: mineeva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 13.04.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 27.10.2022 г.

Приведены результаты исследования вертикального распределения абиотических характеристик и хлорофилла (Хл *a*) в Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах летом 2021 г. Измерения выполнены с борта экспедиционного судна с помощью погружного многопараметрического зонда YSI EXO2. Содержание Хл *a* изменялось от 5.5–8.5 до >100 мкг/л на Средней Волге, до 22 и 47 мкг/л – на Нижней Волге и было типичным для летнего максимума фитопланктона волжских водохранилищ. При отсутствии плотностной стратификации для большинства станций выявлено равномерное распределение Хл *a* в водной толще с коэффициентами вариации не более 20%.

Ключевые слова: хлорофилл, вертикальное распределение, водохранилища Средней и Нижней Волги

DOI: 10.31857/S0367059723020099, **EDN:** MXTUIT

Водоохранилища Волги, расположенные в различных природно-климатических зонах, относятся к объектам многолетних гидроэкологических исследований [1, 2]. Водоохранилища характеризуются сложной гидродинамической структурой, которая определяется наличием разнородных водных масс [3, 4]. Их взаимодействие в сочетании с морфометрическими особенностями водоемов обуславливает пространственную неоднородность и временную изменчивость в распределении гидрофизических и гидрохимических характеристик, а также гидробионтов [5]. Сведения о пространственном распределении биоты необходимы для объективного представления о состоянии водной среды.

Фитопланктон играет важную функциональную, средообразующую и индикаторную роль в экосистеме водоема [6]. Универсальным эколого-физиологическим маркером развития, состояния и продукционного потенциала фитопланктона, а также индикатором трофического статуса водоема и качества воды служит содержание основного фотосинтетического пигмента хлорофилла *a* [7, 8]. В волжских водохранилищах подробно исследовано разномасштабное горизонтальное распределение хлорофилла [6, 9]. Данные о его распределении в столбе воды в основном ограничены оценкой для трех больших слоев водной толщи [6], что оправдано трудоемкостью лабораторных

анализов. Детальные сведения о вертикальном распределении Хл *a* немногочисленны [10–12]. Восполнить этот пробел позволяет современная аппаратура, с помощью которой измерение хлорофилла проводится *in situ* [13–15 и мн. др.].

Цель настоящей работы – исследовать вертикальное распределение фитопланктона в водохранилищах Волги по результатам непрерывного измерения флуоресценции хлорофилла в водной толще.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал собран 24 августа–11 сентября 2021 г. на 57 станциях водохранилищ Средней и Нижней Волги. Содержание хлорофилла *a* (Хл *a*), а также абиотические параметры водной среды (температуру, электропроводность, растворенный кислород) измеряли с борта экспедиционного судна с помощью погружного многопараметрического зонда YSI EXO2 (YSI Inc., США), оснащенного системой флуоресцентной диагностики хлорофилла. Источниками возбуждающего света с длиной волны 470 и 590 нм служат светодиодные излучатели, выход флуоресценции регистрируется в красной области при 685 нм, расчет концентрации пигмента заложен в программное обеспечение прибора. Зондирование водной толщи осуществляли от поверхности до дна с дискретностью записи в 1 с,

Таблица 1. Морфометрические характеристики водохранилищ Средней и Нижней Волги

Водохранилище	Объем, км ³	Площадь, км ²	Длина, км	Глубина, м		K _{ВОД} , год ⁻¹
				средняя	макс.	
Средняя Волга (58°03′–53°31′ с.ш., 38°50′–49°25′ в.д.)						
Горьковское	8.70	1591	430	5.5	21.0	6.1
Чебоксарское	12.60	1270	341	4.7	21.0	20.9
Куйбышевское	57.30	6150	510	9.3	41.0	4.2
Нижняя Волга (53°28′–48°42′ с.ш., 49°42′–44°30′ в.д.)						
Саратовское	12.87	1831	312	7.0	31.0	19.1
Волгоградское	31.45	3117	540	10.0	41.0	8.0

Примечание. K_{ВОД} – коэффициент условного водообмена.

Таблица 2. Абиотические характеристики водохранилищ Средней и Нижней Волги в период исследования (средние величины со стандартной ошибкой: над чертой – в поверхностном, под чертой – в придонном слоях)

Водохранилище	Прозрачность, м	Цветность, град.	Температура, °С	Растворенный кислород, мг/л	Электропроводность, мкСим/см
Горьковское	1.2 ± 0.1	48 ± 2	<u>20.5 ± 0.2</u>	<u>8.8 ± 0.1</u>	<u>198 ± 3</u>
			20.7 ± 0.1	7.8 ± 0.2	197 ± 3
Чебоксарское	1.2 ± 0.1	36 ± 2	<u>20.5 ± 0.2</u>	<u>8.9 ± 0.2</u>	<u>376 ± 30</u>
			20.7 ± 0.1	7.4 ± 0.2	385 ± 28
Куйбышевское	1.5 ± 0.1	28 ± 1	<u>20.3 ± 0.1</u>	<u>8.2 ± 0.1</u>	<u>400 ± 22</u>
			19.0 ± 0.7	7.4 ± 0.2	385 ± 20
Саратовское	1.7 ± 0.1	30 ± 1	<u>17.9 ± 0.5</u>	<u>9.5 ± 0.2</u>	<u>347 ± 3</u>
			19.1 ± 0.2	8.6 ± 0.2	346 ± 3
Волгоградское	1.5 ± 0.1	30 ± 1	<u>18.5 ± 0.3</u>	<u>9.8 ± 0.1</u>	<u>337 ± 8</u>
			18.7 ± 0.3	9.5 ± 0.1	348 ± 8

получая большие ряды исследованных параметров. В работе использованы величины, осредненные для каждого метрового слоя воды на каждой станции. Для сравнения с данными предыдущих лет [6] рассчитывали содержание Хл *a* в трех больших слоях водной толщи: слой 1 – фотическая зона (0–2 м); слой 2 – от 2 м до средней глубины водохранилища; слой 3 – афотический между средней глубиной и дном. Расчет статистических характеристик при анализе данных выполнен с помощью стандартных компьютерных программ MS Excel 2010 и Statistica v.8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из восьми волжских водохранилищ, простирающихся от южной тайги до полупустыни, к Средней Волге относятся внутрикаскадные Горьковское, Чебоксарское и Куйбышевское, к Нижней Волге – замыкающие каскад Саратовское и Волгоградское. Все водохранилища, основные характеристики которых приведены в табл. 1, относятся к равнинным, крупным, относительно мелководным, проточным [1, 2]. Современный

трофический статус Саратовского и Волгоградского водохранилищ оценивается как мезотрофный, Куйбышевского – как умеренно эвтрофный, Горьковского и Чебоксарского – как эвтрофный [16].

Наши исследования выполнены в позднелетний период, когда начинается постепенное выхоложивание водной толщи. Температура воды в Горьковском, Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах была выше, чем в Саратовском и Волгоградском. В двух нижних водохранилищах увеличиваются прозрачность воды, электропроводность, содержание растворенного кислорода и снижается цветность. Очень близкие значения абиотических показателей получены в поверхностном и придонном слоях воды, что свидетельствует об отсутствии плотностной стратификации водной тощи (табл. 2).

Содержание Хл *a* представлено широким диапазоном величин, различающихся на два порядка: от минимальных 5.5–8.5 мкг/л во всех водохранилищах до максимальных >100 мкг/л на Средней Волге, 22 и 47 мкг/л – на Нижней Волге.

Таблица 3. Содержание хлорофилла (мкг/л) в слоях водной толщи водохранилищ Средней и Нижней Волги в период исследования (средние величины со стандартной ошибкой, в скобках – коэффициент вариации величин, %)

Водохранилище	Минимум–максимум	Слой 1	Слой 2	Слой 3
Горьковское	8.5–116	22.0 ± 3.3 (93)	18.4 ± 0.5 (19)	20.4 ± 1.0 (36)
Чебоксарское	8.6–113	26.9 ± 2.2 (52)	29.1 ± 2.0 (40)	25.9 ± 1.6 (51)
Куйбышевское	6.8–96.5	17.6 ± 2.5 (104)	13.6 ± 0.7 (50)	11.8 ± 0.8 (58)
Саратовское	5.5–22.0	11.3 ± 0.9 (43)	13.5 ± 0.6 (28)	13.6 ± 0.4 (29)
Волгоградское	6.1–47.1	19.3 ± 1.9 (54)	25.8 ± 1.2 (39)	25.9 ± 1.4 (44)

Примечание. Слой 1 – фотическая зона (0–2 м); слой 2 – от 2 м до средней глубины водохранилища; слой 3 – афотический между средней глубиной и дном.

Повышенные величины приурочены к верхнему двухметровому слою воды (эвфотной зоне), в котором варибельность Хл *a* выше, чем в более глубоких слоях. Максимальные коэффициенты вариации Хл *a* получены в эвфотной зоне Горьковского и Куйбышевского водохранилищ (табл. 3). Содержание Хл *a* в трех слоях водной толщи водохранилищ меняется неодинаково: в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах оно снижается с глубиной, в Саратовском и Волгоградском увеличивается в толще воды ниже эвфотной зоны, в Чебоксарском повышается в среднем слое и снижается в нижнем. Содержание пигмента в эвфотной и афотической зонах (слои 1 и 3) достоверно различается в Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах ($p < 0.05$).

Из данных вертикального зондирования следует, что варибельность распределения Хл *a* в толще воды невелика. Коэффициенты вариации Хл *a* для 80% станций не превышают 20% и в среднем составляют $6.0 \pm 1.1\%$ в Горьковском водохранилище, от 11.9 ± 2.0 до $15.2 \pm 1.4\%$ – в Чебоксарском, Куйбышевском, Саратовском и $19.8 \pm 1.5\%$ – в Волгоградском.

В верхней части Горьковского водохранилища на станциях глубины 6–7 м концентрации Хл *a* в основном составляют 15–18 мкг/л, в средней части водохранилища ниже Костромского расширения при глубинах 10–12 м увеличиваются до 20–30 мкг/л, а в самой глубокой нижней части снижаются до 15–20 мкг/л. На всех станциях сохраняется равномерное распределение Хл *a* в толще воды (см. рис. 1а). В верхней части Чебоксарского водохранилища на небольшом протяжении – от плотины до г. Н. Новгород – концентрации Хл *a* такие же, как в нижней части Горьковского, и равномерно распределены по глубине. Содержание пигмента увеличивается на порядок ниже впадения крупнейшего притока Волги – р. Оки. Высокоминерализованные окисные воды, прижатые к правому берегу, прослеживаются в водохранилище на значительном расстоянии и сохраняют высокое обилие фитопланктона [17]. В волжской водной массе концентрация Хл *a* заметно ниже (30–40 мкг/л), чем в окской, хотя и возрастает вдвое по сравнению с верхним водохранилищем.

Лишь ниже впадения р. Ветлуги с приближением к плотине концентрации Хл *a* уменьшаются до 10–20 мкг/л и не превышают 10–12 мкг/л в верхнем бьефе Чебоксарской ГЭС. В водной толще нижнего участка количество Хл *a* постепенно снижается с глубиной, и только перед плотинной он равномерно распределен в столбе воды (см. рис. 1б).

Аналогичная ситуация наблюдается в Куйбышевском водохранилище. В его верхней части отмечаются такие же величины, как на приплотинном участке Чебоксарского. Содержание Хл *a* увеличивается до 18–25 мкг/л ниже впадения р. Свияги и незначительно меняется на 100-км участке до впадения второго крупнейшего волжского притока р. Камы. Ниже Камского устья и вплоть до плотины Жигулевской ГЭС количество пигмента не превышает 7–15 мкг/л и только в устье р. Усы возрастает до 23 мкг/л (см. рис. 1в). На верхнем участке Саратовского водохранилища сохраняются невысокие концентрации Хл *a* (5–8 мкг/л), которые постепенно увеличиваются до 10–15 мкг/л в средней части, достигая 20 мкг/л перед плотинной (см. рис. 1г).

На верхнем 80-км участке Волгоградского водохранилища сохраняются величины около 20 мкг/л. Они увеличиваются до 30–40 мкг/л на большом протяжении от г. Саратова до г. Камышин и снижаются до 10–15 мкг/л на нижнем 80-км участке от п. Горный Балыклей до плотины (см. рис. 1д). В толще воды Куйбышевского и Саратовского водохранилищ Хл *a* в основном распределен равномерно. Исключение составляют две русловые станции: в районе г. Новоульяновска (Куйбышевское) на разных глубинах количество Хл *a* варьирует от 8 до 13 мкг/л и против пос. Духовницкое (Саратовское) – от 14 до 20 мкг/л. В Волгоградском водохранилище такая ситуация встречается чаще: на 8 из 12 станций количество Хл *a* по глубине меняется на 30–40%, но какой-либо направленности этих изменений не прослеживается.

Для ряда станций характерен заметный перепад концентрации Хл *a* в самом верхнем метровом слое, а также в метровом слое у дна. У поверх-

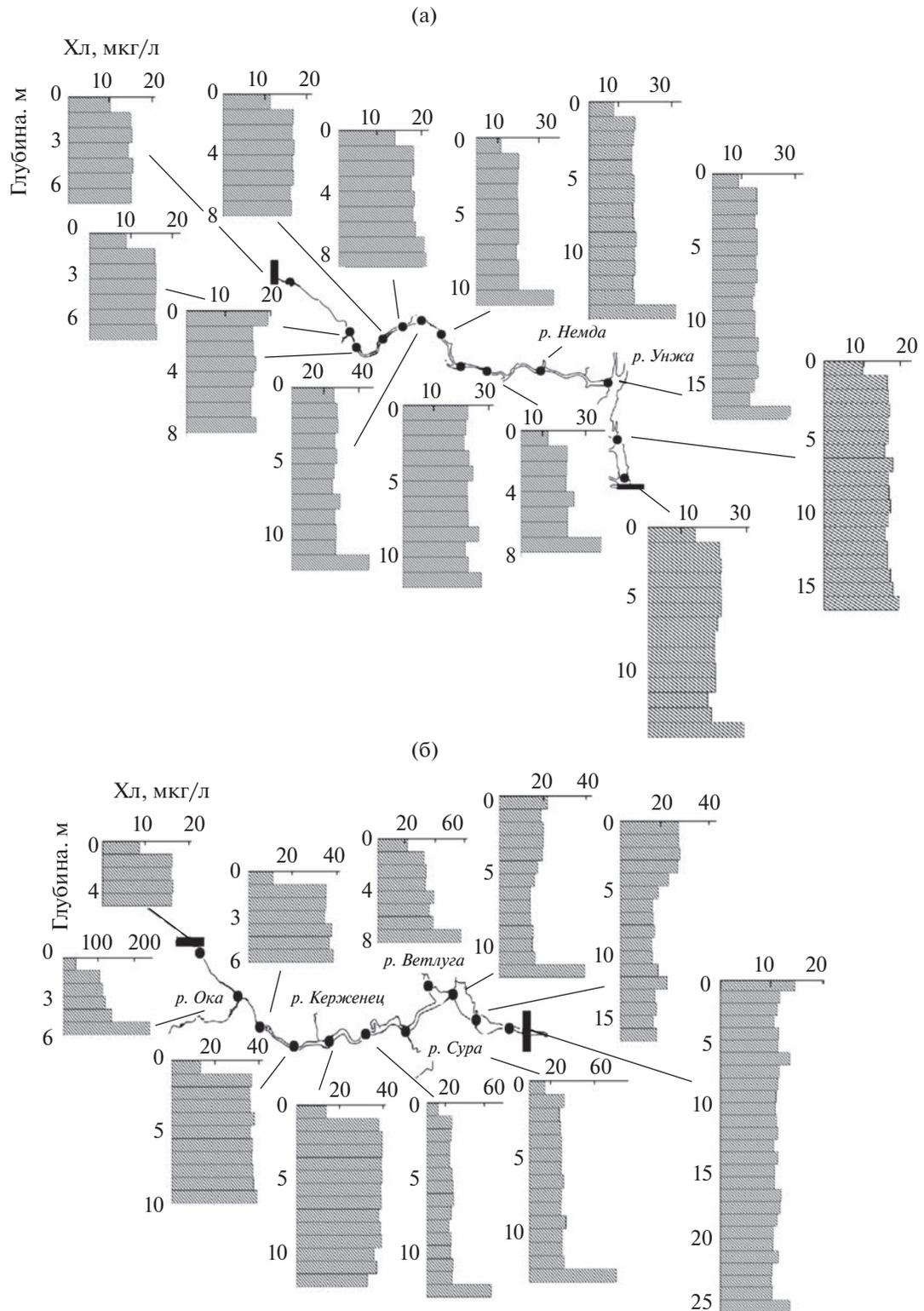


Рис. 1. Вертикальное распределение хлорофилла на станциях Горьковского (а), Чебоксарского (б), Куйбышевского (в), Саратовского (г) и Волгоградского (д) водохранилищ.

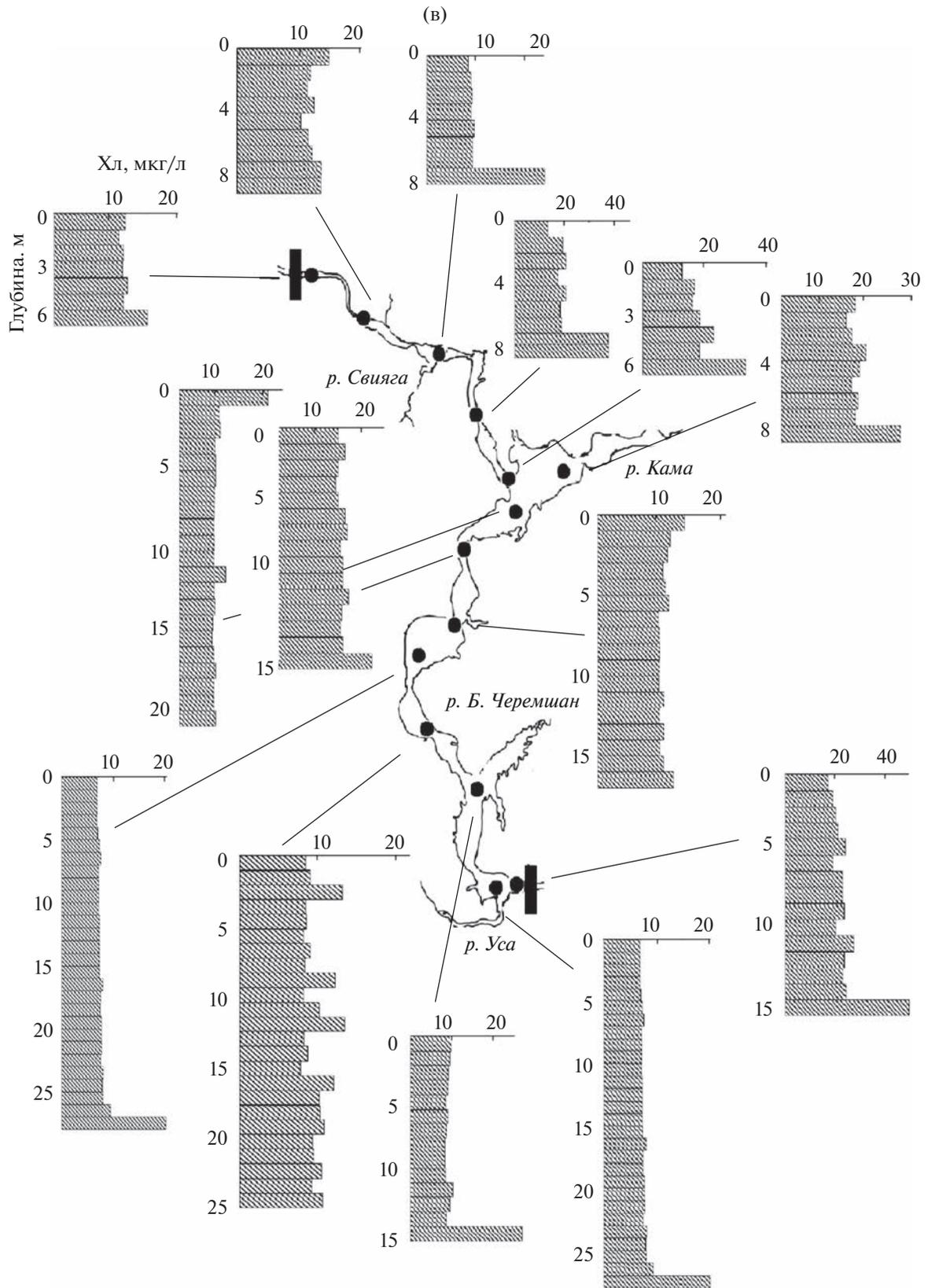


Рис. 1. Продолжение.

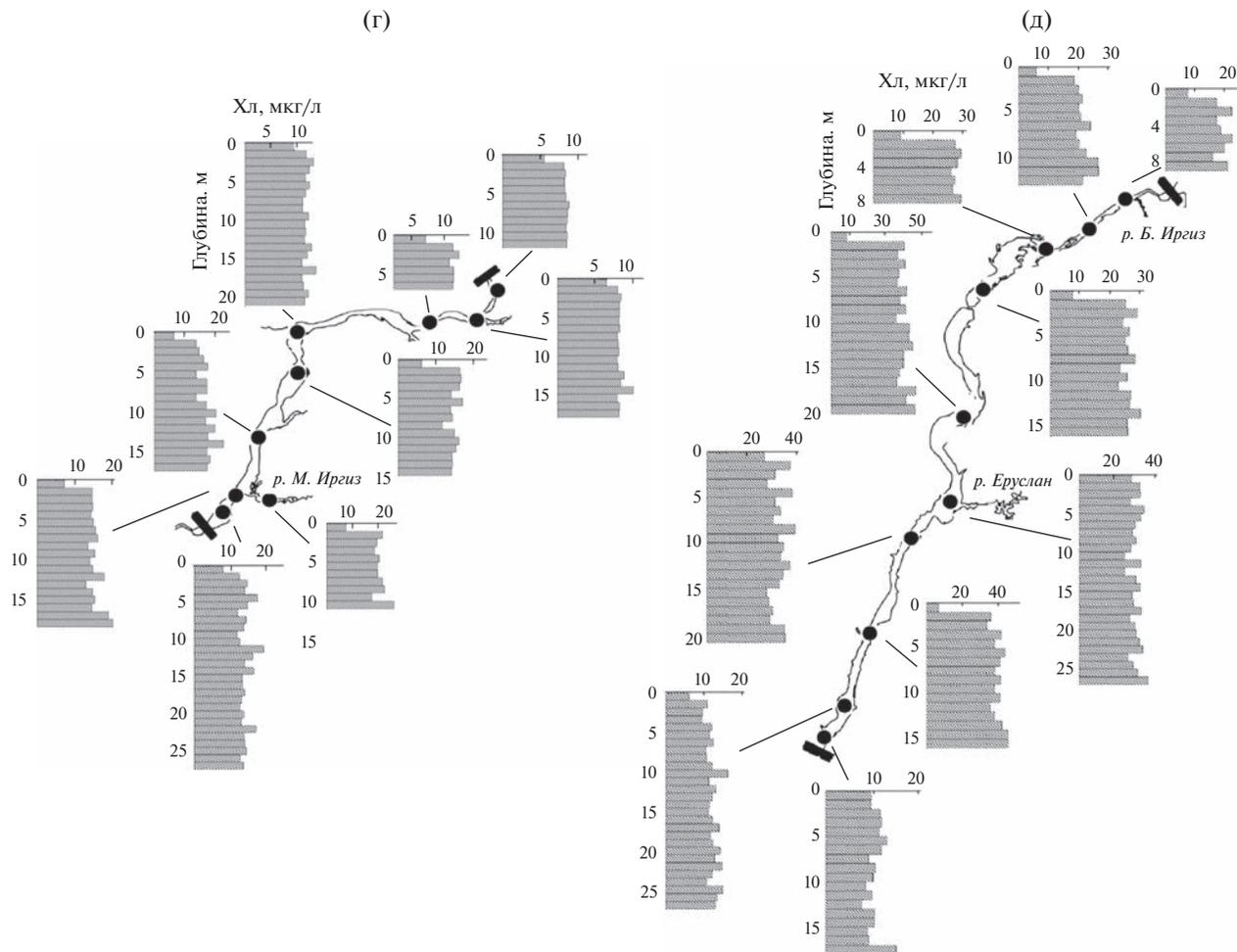


Рис. 1. Окончание.

ности отмечены наиболее низкие величины, которые увеличиваются в среднем в 1.5–2 раза на глубине 1 м, и только в Куйбышевском водохранилище эти различия не выявлены. В придонном слое Горьковского, Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ содержание пигмента максимально и в среднем в 1.4–1.8 раза выше, чем в метре от дна. В Саратовском и Волгоградском водохранилищах этого не наблюдается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фитопланктон обитает в открытой воде, для которой характерна нестабильность. Пространственная неоднородность альгоценозов играет важную роль в формировании продуктивности водных экосистем и качества водной среды. На вертикальное распределение водорослей оказывают влияние морфометрия водоема, условия перемешивания, термический и гидрооптический режимы, обеспеченность биогенным питанием, пресс зоопланктона, а также физиологические

особенности видов [14, 18–20]. Вертикальное распределение фитопланктона хорошо изучено для глубоких стратифицированных озер и морских вод, где оно связано с плотностным и температурным расслоением водной толщи [21–26].

В водохранилищах Волги при относительно небольших глубинах и повышенной гидродинамической активности плотностная и температурная стратификация наблюдается редко [2]. Подтверждением служат близкие величины абиотических показателей в поверхностном и придонном слоях воды (см. табл. 2). К особенностям волжского каскада относится и его значительная протяженность в меридиональном направлении. Зональными изменениями условий водосборного бассейна обусловлено увеличение электропроводности воды и снижение цветности в нижних водохранилищах. При этом увеличение прозрачности на Нижней Волге связано с увеличением глубины, а отмеченные в период наблюдения температурные различия — с региональными погодными условиями, из-за которых прогрев воды

в Саратовском и Волгоградском водохранилищах был ниже, чем на Средней Волге.

Содержание Хл *a* представлено широким диапазоном величин, которые типичны для летнего периода в развитии фитопланктона волжских водохранилищ [6]. Водоросли в основном равномерно распределены в водной толще, что подтверждают низкие (не более 20%) коэффициенты вариации средних концентраций Хл *a* на станциях. Наиболее вариабельно вертикальное распределение Хл *a* в замыкающем каскад Волгоградском водохранилище, которое характеризуется высокой скоростью течения и нестабильным водным режимом, меняющимся в зависимости от суммарного стока Волги [27]. Следует отметить, что распределение фитопланктона (Хл *a*) по акватории волжских водохранилищ характеризуется более высокой изменчивостью, обусловленной их морфометрическими и гидродинамическими особенностями, наличием различных водных масс, влиянием притоков [6].

Для ряда участков отмечены повышенное содержание и вариабельность Хл *a* в фотическом (0–2 м) слое, связанные с развитием синезеленых водорослей (цианопрокариот) – доминантов летнего планктона [28]. Они в массе вегетируют при достаточном прогреве воды и преобладании штормовых условий, регулируют свою плавучесть и формируют скопления в верхних слоях воды [14, 18–20]. В период исследований это в основном отмечено в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах, для которых характерны сложная морфометрия, наличие заливов, мелководных расширений и эстуарных зон притоков. В проточных более простых по конфигурации и напоминающих реку Саратовском и Волгоградском водохранилищах, где создаются благоприятные условия для развития диатомовых водорослей, количество Хл *a* увеличивается в толще воды ниже эвфотной зоны за счет осаждения клеток и их взаимодействия с течением.

Во всех водохранилищах, а особенно часто в южных Саратовском и Волгоградском, отмечено минимальное содержание Хл *a* у поверхности и его увеличение в пределах верхнего метрового слоя. Объяснением может служить опускание водорослей с поверхности из зоны избыточной освещенности в зону с оптимальными световыми условиями, позволяющие избежать светового ингибирования фотосинтетических процессов [19]. Известно, что фитопланктон приспосабливается к меняющейся освещенности с помощью фенотипических реакций и изменений состава пигментов [29].

Еще одна особенность вертикального распределения Хл *a* – его повышенное содержание в придонной воде, чаще наблюдаемое на Средней Волге. Известно, что и жизнеспособные, и отмер-

шие клетки водорослей опускаются в глубокие слои [19], и хлорофилл может долго сохраняться в донных осадках [30]. В водохранилищах Средней Волги, где преобладают илистые отложения с повышенным содержанием Хл *a*, небольшие глубины способствуют его ресуспензии при взмучивании седиментов. Для Нижней Волги характерны песчаные отложения с более низким содержанием Хл *a*, которое не увеличивается в придонной воде из-за высокой скорости течения, препятствующей осадконакоплению [31].

Для распределения хлорофилла в основной водной толще водохранилищ Средней и Нижней Волги определенных тенденций не выявлено. В большинстве случаев распределение носит равномерный характер, и только на нижнем участке Чебоксарского водохранилища количество Хл *a* постепенно уменьшалось с глубиной. Иную картину мы наблюдали для водохранилищ Верхней Волги, где количество Хл *a* в толще воды снижалось [10]. Исходя из гидрологических особенностей водохранилищ [32, 33] следует, что снижение Хл *a* происходило плавно на неглубоких (5–7 м) верхних участках Ивановского и Угличского водохранилищ с относительно постоянными по скорости и направлению стоковыми течениями. Резкое снижение Хл *a* в толще воды наблюдалось на более глубоких (10–17 м) русловых станциях со сложной системой течений и круговоротов, взаимодействием сбросных расходов гидроузлов и стока притоков при устойчивой поперечной циркуляции вод, зависящей от направления ветра и рельефа дна. На приплотинном участке, где при изменении сбросных расходов в русловой зоне образуются волны попуска, а течения быстро возникают и прекращаются в зависимости от суточных сбросов воды, отмечено плавное снижение Хл *a* в верхних слоях воды – до 6–7 м. Изменение содержания Хл *a* по глубине в зависимости от гидрометеорологической ситуации, а также на участках с разным режимом проточности выявлено в Воткинском, Камском [11] и Павловском [12] водохранилищах.

Описанные ситуации характерны для водохранилищ Средней и Нижней Волги. В частности, для верхнего участка Саратовского водохранилища показано изменение естественного динамического режима за счет взаимодействия попусков ГЭС и вод притоков, что обуславливает краткосрочные изменения водных характеристик и их пространственную неоднородность [34]. Но, вероятно, влияние динамических процессов на распределение фитопланктона в толще воды исследованных водохранилищ нивелируется высокими скоростями течения и высокой водностью, связанной с увеличением стока Волги с севера на юг [1, 2].

Таким образом, в водохранилищах Средней и Нижней Волги на участках с разными глубинами, при повышенной гидродинамической активности, отсутствии плотностной и температурной стратификации водоросли в основном равномерно распределены в толще воды. Коэффициенты вариации средних концентраций Хл *a* на станциях не превышают 20%. Снижение содержания Хл *a* у поверхности чаще наблюдается в двух нижних водохранилищах и свидетельствует об опускании водорослей из зоны избыточной освещенности в зону с оптимальными световыми условиями. Повышенное содержание Хл *a* в придонной воде, более типичное для Средней Волги, связано с сохранением Хл *a* в донных илистых отложениях и его ресуспензией при взмучивании седиментов.

Работа выполнена в Институте биологии внутренних вод РАН в рамках государственных заданий № 121051100099-5 и 121051100104-6.

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Авторы подтверждают, что настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волга и ее жизнь / Ред. Буторин Н.В., Мордухай-Болтовской Ф.Д. Л.: Наука, 1978. 348 с.
2. Rivers of Europe. 2nd ed. / Eds. Tockner K., Zarfl Ch., Robinson Ch. Amsterdam: Elsevier, 2021. 942 p.
3. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 319 с.
4. Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах волжского каскада. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. 83 с.
5. Экологические факторы пространственного распределения и перемещения гидробионтов / Ред. Поддубный А.Г. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 336 с.
6. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
7. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
8. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
9. Структура и функционированием экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века / Ред. Лазарева В.И. М.: РАН, 2018. 456 с.
10. Минеева Н.М., Мухутдинов В.Ф. Вертикальное распределение хлорофилла в водохранилищах Верхней Волги // Биология внутренних вод. 2018. № 1. С. 19–28. [Mineeva N.M., Mukhuidinov V.F. Vertical distribution of chlorophyll in the Upper Volga reservoirs // Inland Water Biology. 2018. V. 11, № 1. P. 13–20. <https://doi.org/10.1134/S199508291801011>]
11. Беляева П.Г. Вертикальное распределение растительных пигментов в водохранилищах Средней Камы // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Пермь: Пермский гос. национальный исследовательский ун-т, 2019. С. 50–55.
12. Мухутдинов В.Ф. Вертикальное распределение хлорофилла, оценка трофического статуса и качество воды Павловского водохранилища в летнюю межень 2019 года // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VIII Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Пермь: Пермский гос. национальный исследовательский ун-т, 2021. С. 519–524.
13. Gregor J., Maršálek B. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll *a*: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods // Water Research. 2004. V. 38. № 3. P. 517–522.
14. Moreno-Ostos E., Cruz-Pizarro L., Basanta A., George D.G. The influence of wind-induced mixing on the vertical distribution of buoyant and sinking phytoplankton species // Aquat. Ecol. 2009. V. 43. P. 271–284.
15. Rolland A., Rimet F., Jacquet S. A two-year survey of phytoplankton in the Marne Reservoir (France): A case study to validate the use of an in situ spectrofluorometer by comparison with algal taxonomy and chlorophyll *a* measurement // Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems. 2010. V. 398. № 02. P. 1–19. (Open Access: <http://www.kmae-journal.org>)
16. Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутренних вод. 2020. № 2. С. 205–208. [Mineeva N.M., Semadeny I.V., Makarova O.S. Chlorophyll content and the modern trophic state of the Volga river reservoirs (2017–2018) // Inland Water Biology. 2020. V. 13. № 2. P. 327–330. <https://doi.org/10.1134/S199508292002008X>]
17. Минеева Н.М., Литвинов А.С., Степанова И.Э., Кочеткова М.Ю. Содержание хлорофилла и факторы его пространственного распределения в водохранилищах Средней Волги // Биология внутренних вод. 2008. № 1. С. 68–77.
18. Moreno-Ostos E., Cruz-Pizarro L., Basanta A., George D.G. The spatial distribution of different phytoplankton functional groups in a Mediterranean reservoir // Aquat. Ecol. 2008. V. 42. P. 115–128.
19. Reynolds C.S. The ecology of phytoplankton. Cambridge: University Press, 2006. 534 p.
20. Lofton M., Leach T.H., Beisner B., Carey C. Relative importance of top-down vs. bottom-up control of lake phytoplankton vertical distributions varies among fluorescence-based spectral groups // Limnology and Oceanography. 2020. V. 65. Is. 10. P. 2485–2501. <https://doi.org/10.1002/lno.11465>
21. Scofield A., Watkins J., Osantowski E., Rudstam L. Deep chlorophyll maxima across a trophic state gradient: A case study in the Laurentian Great Lakes // Limnology and Oceanography. 2020. V. 65. Is. 10. P. 2460–2484. <https://doi.org/10.1002/lno.11464>
22. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морской экологич. журн. 2005. Т. 4. № 1. С. 15–45.

23. *Кириллова Т.В.* Вертикальное распределение и межгодовая динамика пигментных характеристик фитопланктона Телецкого озера // Мир науки, культуры, образования. 2008. № 1 (8). С. 4–8.
24. *Котовицков А.В., Кириллова Т.В.* Пространственная неоднородность и динамика пигментных характеристик фитопланктона гипергалинного озера Большое Яровое // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 6 (31). С. 422–428.
25. *Fietz S., Kobanova G., Izmet'eva L., Nicklisch A.* Regional, vertical and seasonal distribution of phytoplankton and photosynthetic pigments in Lake Baikal // J. Plankton Rerearch. 2005. V. 27. № 8. P. 793–810.
26. *Hamilton D.P., O'Brien K.R., Burford M.A. et al.* Vertical distributions of chlorophyll in deep, warm monomictic lakes // Aquatic Sciences. 2010. V. 72. P. 295–307.
27. *Паутова В.Н., Номоконова В.И.* Динамика фитопланктона Нижней Волги – от реки к каскаду водохранилищ. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2001. 279 с.
28. *Корнева Л.Г.* Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома : Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
29. *Girdner S., Mack J., Buktenica M.* Impact of nutrients on photoacclimation of phytoplankton in an oligotrophic lake measured with long-term and high-frequency data: implications for chlorophyll as an estimate of phytoplankton biomass // Hydrobiologia. 2020. V. 847. P. 1817–1830.
<https://doi.org/10.1007/s10750-020-04213-1>
30. *Сигарева Л.Е.* Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.: Тов-во научн. изд. КМК, 2012. 217 с.
31. *Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А.* Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 105–114.
32. *Поддубный С.А., Герасимов Ю.В., Новиков Д.А.* Структура течений и распределение рыб в речных плесах верхневолжских водохранилищ // Биология внутренних вод. 2003. №. 1. С. 89–98.
33. Экологические проблемы Верхней Волги / Ред. Копылов А.И. Ярославль: ЯГТУ, 2001. 427 с.
34. *Рахуба А.В.* Суточная изменчивость качества вод водохранилища в зоне неустановившегося динамического режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2009. № 2. С. 15–25.