

## ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРОЕКТИРУЕМОМ НИЗКОНАПОРНОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА р. ДОН<sup>1</sup>

© 2020 г. Ю. С. Даценко<sup>а</sup>, \*, В. В. Пуклаков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Москва, 119991 Россия

\*e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2018 г.

После доработки 07.02.2018 г.

Принята к публикации 26.04.2018 г.

Представлены результаты гидроэкологического моделирования изменений биомассы фитопланктона, биогенных веществ и содержания растворенного кислорода на участке Нижнего Дона в проектируемом Багаевском водохранилище при различных вариантах его проектных уровней и возможных природных и антропогенных воздействий. Показана определяющая роль попусков воды Цимлянского гидроузла в формировании экологического состояния проектируемого водохранилища.

*Ключевые слова:* водохранилище, гидроэкологическое моделирование, фитопланктон, биогенные вещества, растворенный кислород.

DOI: 10.31857/S0321059620010046

### ВВЕДЕНИЕ

Участок р. Дон ниже Цимлянского гидроузла характеризуется крайне напряженным водоохозяйственным балансом. Проблемы рыбного хозяйства, водоснабжения, ирригации и особенно судоходства резко возрастают на этом участке в периоды маловодья. Неизбежное в это время снижение попусков из Цимлянского водохранилища привело к необходимости гидротехнического решения вопроса обеспечения гарантированных глубин для пропуска судов. С этой целью на р. Дон ниже Цимлянской ГЭС (323 км от устья р. Дон) в разное время были построены 3 низконапорных гидроузла: Николаевский (260 км), Константиновский (209 км) и Кочетовский (179 км). Водные пути ниже Кочетовского гидроузла не зарегулированы, плавание здесь затруднено малыми глубинами на перекатах, наличием крутых излучин, ограничивающих видимость судового хода. Планируемое решение проблемы предусматривает дополнение имеющегося каскада водохранилищ еще одним долинным водохранилищем с низконапорной плотиной у ст. Багаевской (95 км от устья р. Дон).

Разработка любого гидротехнического проекта связана с обязательной оценкой экологических

последствий его создания. Требуется надежная количественная оценка возможных в результате строительства Багаевского гидроузла изменений гидрохимического и гидробиологического режимов регулируемого участка Нижнего Дона. Особенно актуально для этого региона, находящегося под влиянием сбросов эвтрофного Цимлянского водохранилища, изменение развития фитопланктона и интенсивности “цветения” воды в вегетационный период, с которым связаны возможные ограничения водопользования и рекреации.

Сложность прогнозирования развития фитопланктона в водохранилищах определяется сочетанием большой изменчивости погодных условий в вегетационный период и совершенно недостаточной из-за исключительно большой трудоемкости обработки проб фитопланктона информации о развитии “цветения” водорослей. Решение проблемы репрезентативных оценок состояния фитопланктона и качества воды водохранилища возможно путем применения хорошо верифицированной математической модели, в которой учтены как особенности гидрометеорологического режима, так и интенсивность химико-биологических процессов в водоеме, что делает возможным выполнять многовариантные расчеты состояния водных масс с суточным шагом счета.

Цель настоящей работы — на основе расчетов по гидроэкологической модели водохранилища ГМВ-МГУ [4, 6, 10] оценить количественные изменения развития фитопланктона, режима био-

<sup>1</sup> Модельная параметризация расчета развития фитопланктона выполнена авторами при поддержке РФФИ (проект 14-17-00155). Обобщающий анализ результатов прогноза фитопланктона в Багаевском водохранилище проведен при поддержке РФФИ (проект 18-05-01066).

**Таблица 1.** Средние и предельные величины содержания (мг/л) биогенных веществ на участке у плотины Цимлянского водохранилища [8]

| Сезон | Горизонт воды | Величина | NH <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | NO <sub>2</sub> | PO <sub>4</sub> |
|-------|---------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Весна | Поверхностный | Среднее  | 0               | 0.24            | 0.005           | 0.032           |
|       |               | Диапазон | 0–0             | 0.05–0.75       | 0–0.030         | 0.005–0.080     |
|       | Придонный     | Среднее  | 0.01            | 0.24            | 0.005           | 0.040           |
|       |               | Диапазон | 0.01–0.03       | 0.05–0.68       | 0–0.030         | 0.004–0.078     |
| Лето  | Поверхностный | Среднее  | 0.14            | 0.14            | 0.007           | 0.023           |
|       |               | Диапазон | 0.01–0.37       | 0–0.45          | 0.001–0.052     | 0.005–0.090     |
|       | Придонный     | Среднее  | 0.11            | 0.26            | 0.006           | 0.030           |
|       |               | Диапазон | 0.03–0.31       | 0.11–0.68       | 0.001–0.053     | 0.002–0.250     |
| Осень | Поверхностный | Среднее  | 0.05            | 0.24            | 0.005           | 0.036           |
|       |               | Диапазон | 0–0.11          | 0.09–0.80       | 0.001–0.030     | 0.005–0.050     |
|       | Придонный     | Среднее  | 0.05            | 0.21            | 0.003           | 0.039           |
|       |               | Диапазон | 0–0.07          | 0.05–0.70       | 0.001–0.030     | 0.005–0.055     |
| Зима  | Поверхностный | Среднее  | 0.16            | 0.22            | 0.060           | 0.042           |
|       |               | Диапазон | 0.04–0.25       | 0.05–2.00       | 0.012–0.122     | 0.005–0.054     |
|       | Придонный     | Среднее  | 0.07            | 1.05            | 0.050           | 0.041           |
|       |               | Диапазон | 0.05–0.10       | 0.05–2.00       | 0.012–0.122     | 0.005–0.055     |

генных веществ, содержащих азот и фосфор, и растворенного кислорода на участке Нижнего Дона в районе проектируемого Багаевского водохранилища в диапазоне возможных природных и антропогенных воздействий при различных вариантах проектных уровней воды в проектируемом водохранилище.

### ФИТОПЛАНКТОН И БИОГЕНЫ В НИЖНЕМ ДОНУ

Водохозяйственная система бассейна Нижнего Дона возникла на базе введенного в эксплуатацию в 1952 г. Волго-Донского комплекса гидротехнических сооружений. Водность р. Дон в нижнем течении определяется, в основном, попусками воды из Цимлянского водохранилища, аккумулирующего 70% стока всего бассейна, а также боковой приточностью, которая формируется на водосборах рек Северский Донец, Сал, Западный Маныч. При естественном режиме годовой сток р. Дон в нижнем течении колебался в пределах от 51 (1942 г.) до 11.8 км<sup>3</sup> (1950 г.) при среднем значении – 27 км<sup>3</sup>. В настоящее время объем речного стока снизился на 25–30% и продолжает сокращаться.

Доля вод боковых притоков в водном балансе участка р. Дон, на котором планируется создание Багаевского водохранилища, составляет не более 4%, остальное – транзитный сток из вышележащего водохранилища, поэтому даже при резких отличиях гидрохимических показателей этих рек от таковых р. Дон их влияние проявляется очень

слабо. Определяющий фактор развития для фитопланктона – поступление в водоем биогенных элементов (азота, фосфора, кремния). В многолетней изменчивости режима поступления биогенных элементов в пределах Нижнего Дона значительную роль сыграло преобразование речного стока Цимлянским водохранилищем, в результате чего изменилась скорость поступления биогенных веществ в нижний бьеф Цимлянского гидроузла и трансформировался их качественный состав [6]. Во внутригодовой изменчивости концентраций биогенных веществ в приплотинном плесе Цимлянского водохранилища проявляются общие для водоемов умеренных широт закономерности – максимальные концентрации наблюдаются в конце зимнего периода, минимальные – в период их активного потребления летом. К сожалению, сведений в литературе о количественных характеристиках этих изменений немного. Поэтому при моделировании экологического состояния проектируемого водохранилища приходится ориентироваться на диапазоны колебаний концентраций минеральных форм азота и фосфора в районе Нижнего Дона и в воде, сбрасываемой из Цимлянского водохранилища, приведенные в литературе [3, 6, 7]. Эти обобщения представлены в табл. 1.

На участке проектируемого водохранилища р. Дон принимает несколько небольших притоков, наиболее крупные из которых – реки Сал и Маныч, характеризующиеся невысокими концентрациями минерального азота (до 0.5 мг/л) и фосфора (до 90 мкг/л) [7].

К антропогенным источникам биогенных веществ относятся точечные и диффузные поступления азота и фосфора со сбросами сточных вод промышленности и со стоком с сельскохозяйственных угодий рассматриваемого участка Дона. Сельскохозяйственными землями занято ~33% боковой водосборной территории проектируемого водохранилища. Промышленные предприятия, в основном пищевой промышленности, расположены в наиболее крупных населенных пунктах – г. Семикаракорске, ст. Багаевской. Отдельного внимания заслуживает Новочеркасская ГРЭС, сброс охлаждающей воды которой будет поступать непосредственно в водохранилище. Существенными источниками биогенного загрязнения также могут быть населенные пункты, многочисленные дачные участки и рекреационные объекты, расположенные по берегам р. Дон.

Согласно многолетним данным гидробиологического мониторинга и экспедиционных исследований, фитопланктон Нижнего Дона отличается высоким видовым разнообразием. В систематическом плане он представлен шестью отделами: диатомовые (Bacillariophyta), зеленые (Chlorophyta), синезеленые (Cyanophyta), пиррофитовые (Pyrrophyta), золотистые (Chrysophyta) и эвгленовые водоросли (Euglenophyta) [3, 6].

Весной фитопланктон водных объектов Нижнего Дона представлен, в основном, диатомовыми водорослями. В июне после непродолжительной фазы “чистой воды” с минимальной биомассой фитопланктона диатомовые водоросли сменяются водорослями теплолюбивого летнего комплекса, ведущая роль в котором принадлежит синезеленым. Осенние месяцы (сентябрь и октябрь) характеризуются усилением вегетации синезеленых водорослей и дальнейшим возрастанием их доли в фитопланктоне. За счет интенсивной вегетации синезеленых общая биомасса фитопланктона остается на высоком уровне. Доля пиррофитовых микроводорослей незначительна. Эвгленовые и золотистые водоросли отмечаются единично и не во всех пробах. По данным [1], биомасса фитопланктона во второй половине XX в. колебалась в различные сезоны года в пределах 0.003–0.011 мг/л зимой, 0.45–4.32 мг/л весной, 0.44–8.90 мг/л летом–осенью при среднем значении за вегетационный период 2.6 мг/л. При этом было установлено, что на состав и количественное развитие альгофлоры Нижнего Дона доминирующее влияние оказывает Цимлянское водохранилище: сезонные изменения фитопланктона в Нижнем Дону и приплотинном плесе Цимлянского водохранилища полностью идентичны. Современные обследования фитопланктона на участке проектируемого водохранилища показали заметное увеличение диапазона колебаний биомассы фитопланктона в течение вегетационного сезона с 2008 до 2009 г.: непосредствен-

но в р. Дон – от 0.18–7.86 до 0.14–42.25, в р. Сал – от 0.12 до 17.41, в устье р. Северский Донец – от 0.39 до 13.48 мг/л [3].

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА

Прогноз развития фитопланктона проектируемого водохранилища выполнен путем сценарных расчетов по математической модели ГМВ-МГУ для двух проектных уровней НПУ Багаевского гидроузла (г/у): 2.0 и 2.8 м Балтийской системы высот (БС). Расчет по модели позволяет имитировать изменчивость основных физических и гидродинамических процессов, протекающих в водоеме и на его границах с внешней средой, а также рассчитывать изменения концентрации биогенных веществ, растворенного в воде кислорода, развитие основных групп фитопланктона (диатомовых и синезеленых водорослей).

Исходя из морфологических особенностей предполагаемого к затоплению участка Нижнего Дона, водохранилище в модели схематизировано в виде продольной последовательности четырех отсеков водоема: отсек I-1 – от Кочетовского г/у до ст. Раздорской (3005–3032 км судового хода), I-2 – от ст. Раздорской до ст. Мелиховской (3032–3051 км), I-3 – от ст. Мелиховской до ст. Багаевской (3051–3071 км) и I-4 – от ст. Багаевской до Багаевского г/у (3051–3089 км) (рис. 1). Каждый из этих отсеков представляет собой вертикальную серию горизонтальных слоев (боксов), в пределах которых температура и концентрация веществ имеют осредненные значения.

Изменения любой характеристики водной массы в боксе, связанные с ее движением, перемешиванием, фазовыми переходами, превращением теплоты в другие виды энергии, описываются на основе соблюдения закона сохранения вещества и энергии:

$$\frac{\Delta(V_z C_z)}{\Delta t} = A_{z1} C_{z-1} - A_{z2} C_z + A_{z3} C_{z+1} + B_{z1} C_{in} - B_{z2} C_z \pm P_z,$$

где  $C$  – концентрация;  $V$  – объем слоя;  $A$  – фактор, отражающий вертикальный перенос;  $B$  – фактор, отражающий горизонтальный перенос (приток–отток);  $P$  – фактор, отражающий внутримассовые эффекты, оказывающие влияние на концентрацию;  $t$  – время;  $z$  – расчетный горизонт.

Уравнение состояния воды представлено в модели в виде зависимости ее плотности от температуры и электропроводности для пресной воды гидрокарбонатного и сульфатного классов [9]. Алгоритм модели структурирован в виде пяти следующих модулей на основе метода суперпозиции (наложения):

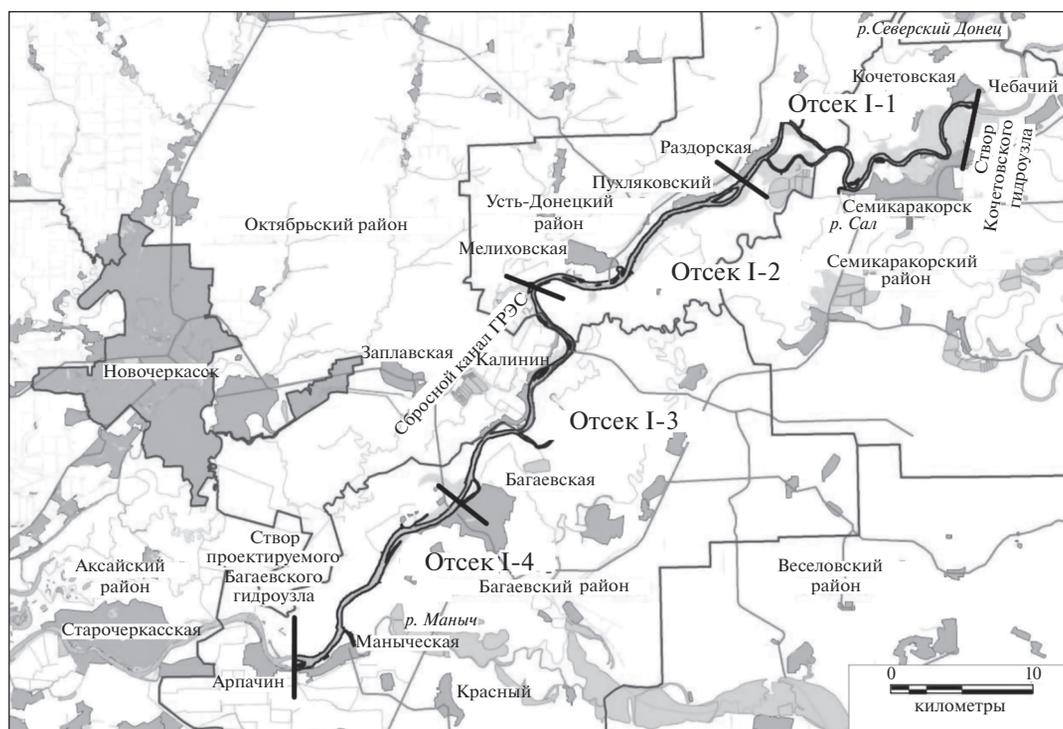


Рис. 1. Картограмма Багаевского водохранилища с делением на расчетные отсеки.

1) гидрометеорологический модуль, в котором рассчитывается трансформация метеоэлементов над водной поверхностью отсеков, водный баланс водохранилища, изменение уровня водной поверхности на конец расчетного шага по времени, теплообмен отсеков с атмосферой и грунтами дна, распределение проникающей солнечной радиации по глубине, возникновение и изменение снежно-ледяного покрова;

2) модуль горизонтальной адвекции, в котором рассчитывается водообмен каждого отсека с внешней по отношению к нему средой и связанная с этим трансформация характеристик качества воды (ХКВ) в боксах;

3) модуль внутреннего горизонтального водообмена, в котором выполняется расчет трансформации ХКВ в боксах в результате внутреннего водообмена между отсеками в виде плотностных, дрейфовых и компенсационных течений;

4) модуль внутреннего вертикального водообмена, в котором рассчитываются три основных вида вертикального перемешивания водной массы водохранилища, возникающих в результате ее взаимодействия с внешней средой;

5) модуль внутримассовой трансформации ХКВ, в котором выполняется расчет неконсервативных характеристик, концентрации которых меняются под влиянием комплекса различных процессов физико-химического, химического и биохимического характера; в алгоритме этого мо-

дуля предусмотрен расчет следующих характеристик: биомассы трех групп фитопланктона (диатомовых, синезеленых и зеленых водорослей), зоопланктона, ихтиофауны, содержания растворенного кислорода, фосфатного, аммонийного и нитратного ионов, нестойкого и стойкого органического вещества, минеральной и органической взвеси, седиментов в донных отложениях; расчет всех этих переменных проводится по уравнениям баланса массы в соответствии с концептуальными схемами взаимосвязей переменных в водной экосистеме.

В конце расчета каждого из модулей осуществляется контроль баланса вещества и энергии в отсеках.

Базовое уравнение для расчета биомассы каждой группы фитопланктона имеет вид:

$$\frac{\Delta B_a}{\Delta t} = K_{ag} B_a - K_{ar} B_a - K_{ae} B_a - K_{am} B_a - \omega_a \frac{\Delta B_a}{\Delta z} - K_z B_z \frac{\sigma_{az} B_a}{\Phi_z} - K_f B_f \frac{\sigma_{af} B_a V}{\Phi_f},$$

где представлены биомассы, г/м<sup>3</sup>:  $B_a$  – фитопланктона,  $B_z$  – зоопланктона,  $B_f$  – рыб; скорости процессов, 1/сут:  $K_{ag}$  – роста,  $K_{ar}$  – дыхания,  $K_{ae}$  – экскреции,  $K_{am}$  – отмирания фитопланктона,  $K_z$  – питания зоопланктона,  $K_f$  – питания рыб;  $\omega_a$  – скорость осаднения фитопланктона, м/сут; коэффициенты предпочтения пищи по фитопланктону:  $\sigma_{az}$  – для зоопланктона,  $\sigma_{af}$  – для рыб;

**Таблица 2.** Диапазон изменений концентраций химических веществ в воде Нижнего Дона по данным наблюдений [3, 7] и результатам расчета для 1986 г.

| Концентрации, мг/л | По литературным данным |          | Результаты расчета |          |
|--------------------|------------------------|----------|--------------------|----------|
|                    | минимум                | максимум | минимум            | максимум |
| Фитопланктон       | 0.30                   | 13.3     | 0.23               | 5.8      |
| Кислород           | 7.15                   | 11.40    | 8.19               | 14.51    |
| Фосфаты            | 0.03                   | 0.39     | 0.04               | 0.07     |
| Аммоний            | 0.02                   | 0.60     | 0.11               | 0.16     |
| Нитриты и нитраты  | 0.03                   | 2.8      | 0.06               | 0.1      |
| ХПК                | 10.0                   | 34.8     | 31.1               | 32.2     |
| Минерализация      | 624                    | 1204     | 929                | 1012     |
| Щелочность         | 162                    | 284      | 249                | 267      |
| Сульфаты           | 179                    | 375      | 253                | 268      |
| Мутность           | 20.0                   | 49.0     | 26.2               | 27.3     |
| Железо             | 0.04                   | 0.7      | 0.05               | 0.07     |
| Кремний            | 3.2                    | 4.4      | 3.6                | 4.0      |

концентрации имеющейся общей весовой пищи в боксе с учетом предпочтений:  $\Phi_z$  – для зоопланктона, г/м<sup>3</sup>;  $\Phi_f$  – для рыб, г;  $V$  – объем бокса, м<sup>3</sup>.

Баланс растворенного кислорода при его внутримассовой трансформации учитывает процессы фотосинтеза, фотодыхания фитопланктона, дыхания зоопланктона и рыб, разложения детрита и растворенного органического вещества, окисления сульфатов, железа и марганца, нитрификацию аммония, потребления донными отложениями и обмен с атмосферой.

Из биогенных веществ моделируется режим наиболее важных для развития фитопланктона элементов: фосфора, азота и кремния. Изменение содержания в воде кремния учитывается только при моделировании развития диатомовых водорослей.

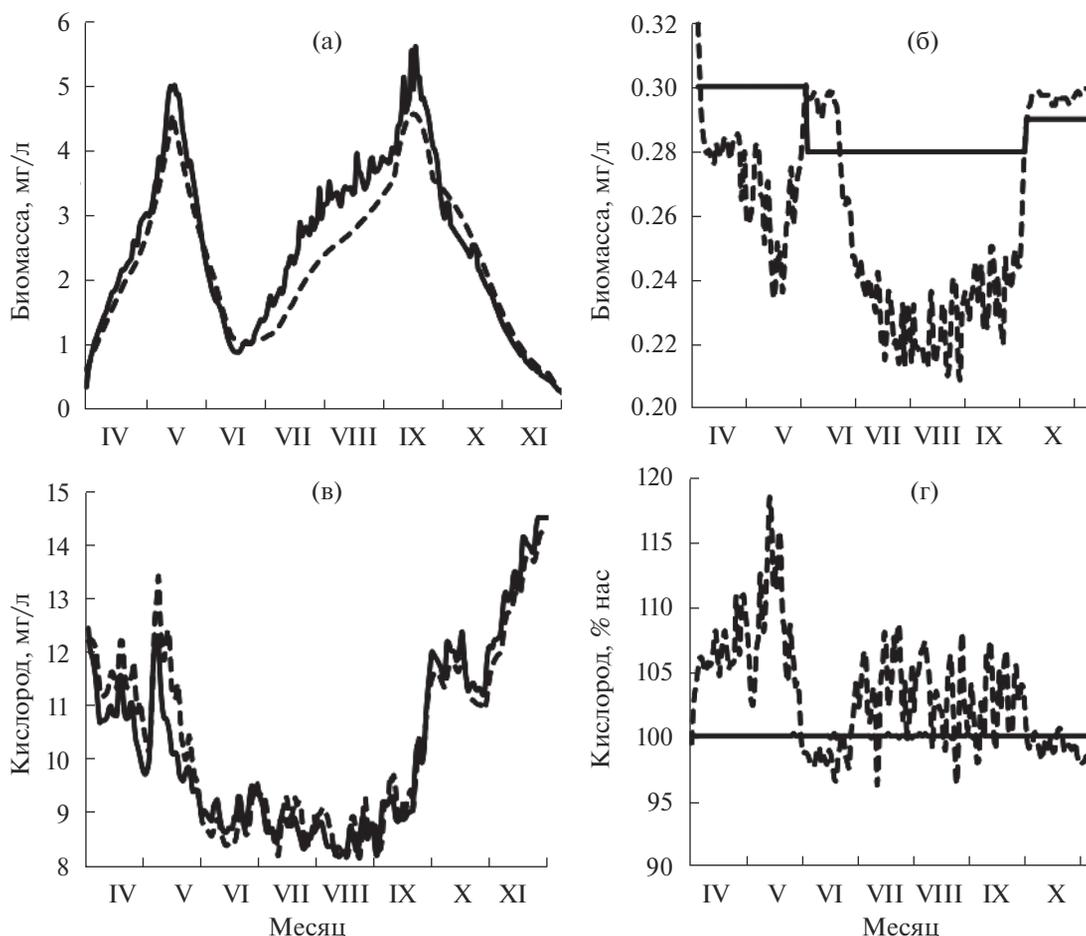
Для проверки адекватности получаемых результатов моделирования изменений ХКВ и калибровки физических и биологических параметров экологического блока модели выполнены расчеты для бытовых условий Нижнего Дона с 1 апреля по 30 ноября среднего по водности 1986 г. В табл. 2 представлены диапазон изменений ХКВ Нижнего Дона по данным литературных источников и результаты этого расчета, которые свидетельствуют о том, что рассчитанные для условий 1986 г. изменения ХКВ Нижнего Дона в пределах проектируемого водохранилища не противоречат данным гидрохимических наблюдений на этом участке Нижнего Дона [2].

Результаты этих расчетов показали также, что развитие фитопланктона и, соответственно, содержание растворенного в воде кислорода во время вегетации водорослей на рассматриваемом

участке Дона в значительной степени определяются изменениями биомассы водорослей в поступающем через Кочетовский г/у стоке (рис. 2а, 2в), т.е. содержанием водорослей в приплотинном плесе Цимлянского водохранилища и устье Северского Донца, что подтверждается и данными полевых исследований [2]. Вариации содержания биогенных веществ в речной воде зависят не только от их поступления через Кочетовский г/у, но и от развития продукционно-деструкционных процессов на рассматриваемом участке Дона (рис. 2б): во время “цветения” основных групп водорослей – диатомового и сине-зеленого комплекса – концентрация биогенных веществ в воде заметно снижается. С этим же связано и повышенное насыщение кислородом (>100%) поверхностных вод в весенне-летний период (рис. 2г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи оценки изменения экологического режима участка Нижнего Дона после создания на нем Багаевского водохранилища разработаны сценарии модельных расчетов для различных по метеоусловиям вегетационных сезонов (аномально жаркие 1972 и 2010 гг., средние по погодным условиям 1986 и 2014 гг., аномально холодный 1987 г.) и различных уровней НПУ проектируемого водохранилища (2.0 и 2.8 м БС). Оценивалось влияние метеоусловий вегетационного сезона, роста биогенной нагрузки и развития фитопланктона в р. Дон выше проектируемого гидроузла, роста биогенной нагрузки с бокового водосбора и влияние сброса в водо-



**Рис. 2.** Поступающие в водохранилище (сплошная линия) и рассчитанные по модели (пунктирная линия) изменения биомассы фитопланктона (а), суммы минеральных форм азота и фосфора (б), содержание кислорода (в) и насыщение воды (г) растворенным кислородом в отсеке 1-4 в 1986 г.

охранилище теплых вод из отводного канала Новочеркасской ГРЭС.

Результаты расчетов показали следующее.

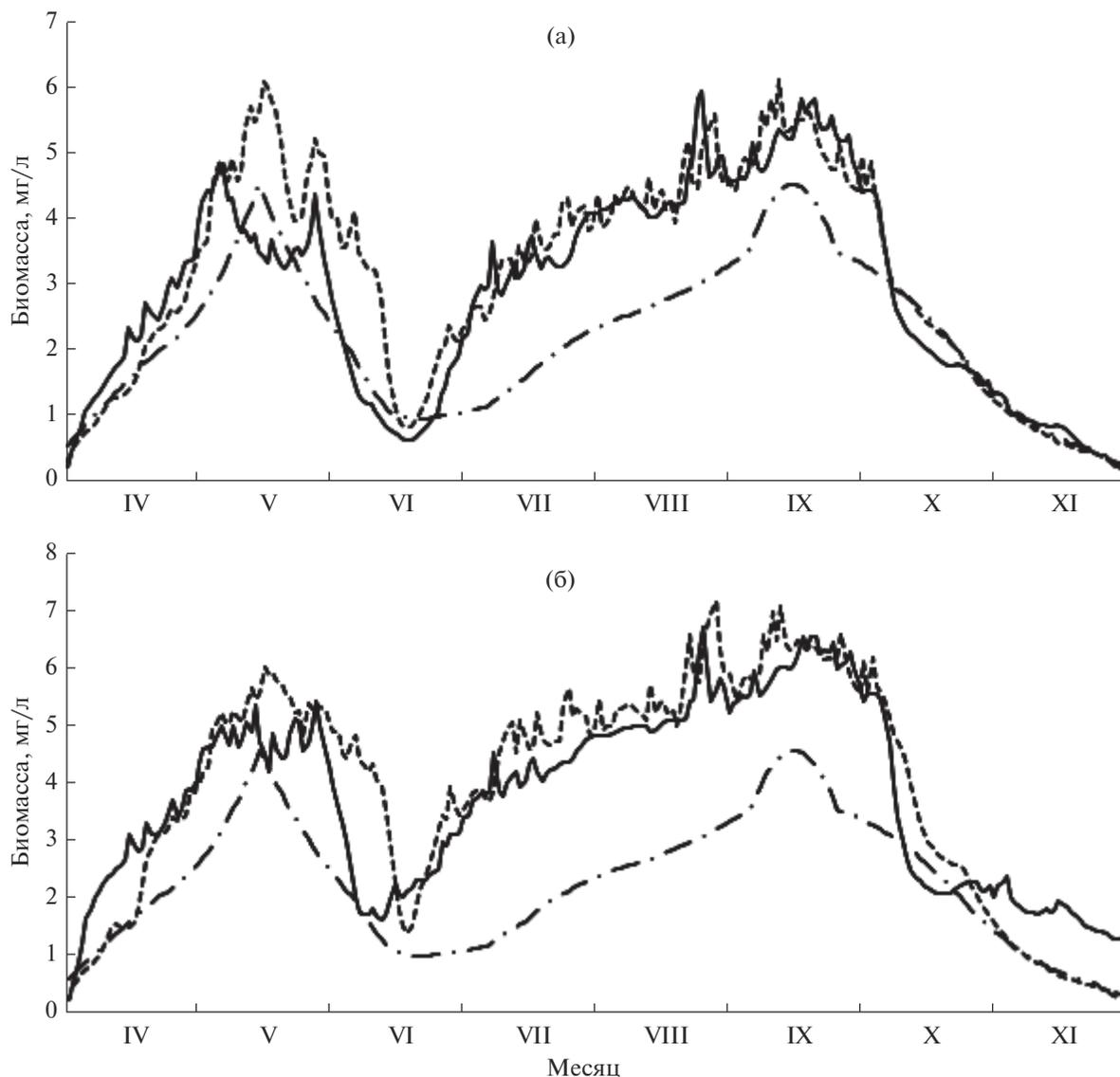
#### *Фитопланктон*

В настоящее время при различных метеорологических характеристиках вегетационных сезонов средние за период “цветения” значения биомассы диатомовых водорослей в поверхностном слое Нижнего Дона изменяются в пределах 2.86–3.53 мг/л, максимальные – в пределах 4.95–6.17, а синезеленых водорослей соответственно в пределах 3.40–3.67 и 5.53–6.23 мг/л. Создание водохранилища с НПУ 2.0 м приведет к увеличению средних величин биомассы диатомовых водорослей по сравнению с существующими условиями не более чем на 5, синезеленых водорослей – на 4–7%. Максимальные среднесуточные величины биомассы водорослей в поверхностном слое увеличатся для диатомовых на 1–5, для синезеленых –

на 1–4%. В нижний бьеф гидроузла будет поступать вода с содержанием синезеленых водорослей в среднем на 1–5% больше, чем в современных условиях.

При НПУ водохранилища 2.8 м средние величины биомассы диатомовых увеличатся на 13–23, максимальные – до 15, в нижний бьеф в период их “цветения” будет поступать вода с повышенной на 7–19% биомассой водорослей. Среднее содержание синезеленых водорослей увеличится на 16–26, максимальное – на 14–17%, их содержание в нижнем бьефе возрастет на 13–21% в зависимости от погодных условий вегетационного сезона.

Результаты расчетов показывают также, что различия метеорологических условий вегетационных сезонов оказывают незначительное влияние на конечный результат продукционных процессов в пределах рассматриваемого участка Нижнего Дона как в существующих условиях, так и при создании Багаевского водохранилища.



**Рис. 3.** Изменения биомассы фитопланктона на входе в Багаевское водохранилище (штрихпунктирная линия) и в его приплотинном плесе в anomalно жарком 2010 г. (сплошная линия) и anomalно холодном 1987 г. (штриховая линия) при НПУ 2.0 м (а) и 2.8 м (б).

Ввиду интенсивного водообмена на участке влиянием погодных условий на интенсивность развития фитопланктона можно пренебречь. На рис. 3 представлены изменения биомассы фитопланктона в различные годы при заданных характеристиках воды, сбрасываемой через Кочетовский гидроузел.

Полученные результаты дают представление лишь о средних величинах биомассы фитопланктона в поверхностном слое воды водохранилища толщиной 0.5–0.8 м, а не о предельных величинах, которые обычно наблюдаются в зонах ветрового нагона. Популяции синезеленых водорослей в дневное время концентрируются в поверхностных слоях воды и при нагонах скапливаются

большими массами в прибрежьях, заливах, бухтах, балках. Так, в Цимлянском водохранилище их биомасса в таких местах может достигать  $>100 \text{ г/м}^3$  [5].

#### *Влияние сбросов теплой воды Новочеркасской ГРЭС*

Диагностические модельные расчеты показали, что в настоящее время влияние ГРЭС на продукционные процессы в пределах рассматриваемого участка Нижнего Дона незначительно. В среднем по климатическим условиям годы (1986 и 2014 гг.) сброс теплой воды ГРЭС в р. Дон привел к снижению биомассы весеннего диатомового комплекса на 3–4% и росту биомассы си-

**Таблица 3.** Рассчитанные концентрации (мг/л) биогенных веществ в проектируемом водохранилище

| Биогены                           | Концентрации | В современных условиях | Проектное значение НПУ |             |
|-----------------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-------------|
|                                   |              |                        | 2.0 м                  | 2.8 м       |
| PO <sub>4</sub>                   | Средняя      | 0.042–0.044            | 0.039–0.042            | 0.037–0.038 |
|                                   | Минимум      | 0.029                  | 0.023                  | 0.025       |
|                                   | Максимум     | 0.076                  | 0.084                  | 0.087       |
| NH <sub>4</sub>                   | Средняя      | 0.118–0.129            | 0.112–0.129            | 0.089–0.096 |
|                                   | Минимум      | 0.067                  | 0.048                  | 0.039       |
|                                   | Максимум     | 0.180                  | 0.190                  | 0.172       |
| NO <sub>3</sub> + NO <sub>2</sub> | Средняя      | 0.064–0.073            | 0.055–0.069            | 0.040–0.042 |
|                                   | Минимум      | 0.024                  | 0.015                  | 0.012       |
|                                   | Максимум     | 0.124                  | 0.139                  | 0.104       |

незеленых водорослей на 1.4–1.5%. При создании проектируемого водохранилища это влияние усиливается, но остается несущественным. Средняя биомасса диатомовых водорослей снизится на 3–7, а синезеленых увеличится на 1–4% по сравнению с аналогичными условиями, но при отсутствии сброса в водохранилище теплых вод ГРЭС. В жаркий 2010 г. влияние теплых вод ГРЭС на диатомовые водоросли усилилось, что привело к снижению средних величин их биомассы и практически не сказалось на биомассе синезеленых водорослей. В холодный 1987 г. теплые воды ГРЭС способствовали повышению биомассы синезеленых водорослей.

#### *Биогенные вещества*

Режим биогенных веществ в водохранилище в значительной степени определяется интенсивностью продукционно-деструкционных процессов в водоеме. Поэтому в летний период их минимальное содержание наблюдается обычно в поверхностных горизонтах незадолго до пика “цветения” фитопланктона, а максимальное – примерно в это же время в наиболее глубоководных придонных слоях водоема.

В табл. 3 представлены диапазоны изменения средних концентраций и их предельные значения для минерального фосфора (PO<sub>4</sub>), аммонийного азота (NH<sub>4</sub>), суммы нитратного и нитритного азота (NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) в приплотинном отсеке проектируемого гидроузла, полученные по результатам расчета различных по метеорологическим условиям вегетационных сезонов и при среднем содержании биогенных веществ во входном створе Кочетовского г/у соответственно для PO<sub>4</sub> – 0.052, NH<sub>4</sub> – 0.146, NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> – 0.090 мг/л.

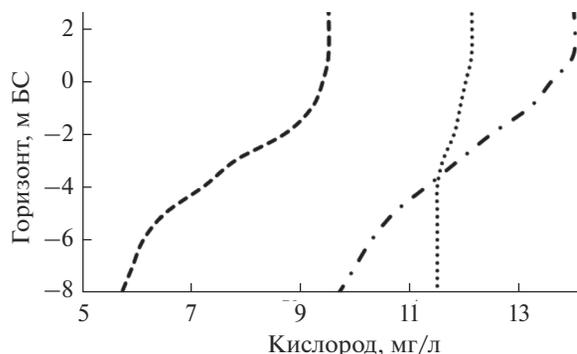
Создание водохранилища с НПУ 2.0 м приводит к снижению средних значений концентрации PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub> и NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> в водохранилище соответственно на 5, 1 и 6% в жаркий год и на 7, 5 и 14% в холодный год по сравнению с существующими условиями. Повышение НПУ водохранилища с 2.0 до 2.8 м приводит к еще большему снижению средних концентраций веществ как в самом водохранилище, так и в нижнем бьефе его гидроузла соответственно на 16, 29 и 44% по сравнению с существующими условиями. Определенный интерес представляет характер развития стратификации биогенных веществ в водохранилище. Разница концентраций в поверхностном и придонном слое наблюдаются и в существующих условиях на этом участке р. Дон. Эти различия обусловлены диффузией биогенов из донных отложений и их потреблением в поверхностном слое. По результатам расчетов, диапазон этих различий составляет для PO<sub>4</sub> – 0–30, NH<sub>4</sub> – 0–140, NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> 0–60 мкг/л. Резкие колебания разницы концентраций в поверхностном и придонных слоях объясняются чередованием условий полного вертикального перемешивания водной толщи и штилевых условий погоды, при которых стратификация устанавливается очень быстро. С подъемом уровня при создании Багаевского гидроузла диапазон вертикальных различий концентрации биогенных веществ увеличивается для всех рассматриваемых веществ. Для PO<sub>4</sub>, например, при подъеме на 2.0 м этот диапазон достигает 45 и при подъеме на 2.8 м – 50 мкг/л. Однако это увеличение не настолько существенно, чтобы заметно повлиять на экологическую ситуацию в водохранилище.

*Растворенный кислород*

Изменчивость содержания растворенного кислорода на рассматриваемом участке Нижнего Дона также определяется, в первую очередь, интенсивностью продукционно-деструкционных процессов в водной массе и обменными процессами на границе воды и атмосферы. По расчетам, в период активной вегетации и диатомовых, и сине-зеленых водорослей величины пересыщения воды кислородом невелики ( $\leq 130\%$ ).

В этот период в водохранилище возникает слабая вертикальная стратификация растворенного кислорода, при которой, однако, зоны аноксии не наблюдаются при всех расчетных сценариях (проектные уровни, гидрометеорологические условия года). Отсутствие аноксии в Багаевском водохранилище объясняется благоприятными условиями гидродинамического перемешивания водной массы водохранилища при высокой его проточности.

При НПУ 2.8 м эти различия немного возрастают, что соответствует ранее отмеченному усилению “цветения” фитопланктона водохранилища при более высоком значении НПУ. Возникновение отмеченной небольшой стратификации кислорода наблюдается только в летний период при максимальном развитии фитопланктона. На рис. 4 показано распределение концентраций растворенного кислорода на приплотинном участке водохранилища в различные периоды. В апреле и октябре при слабом развитии фитопланктона распределение кислорода по вертикали практически однородно, и только в мае при “цветении” воды диатомовыми и в августе при “цветении” синезелеными водорослями концентрация кислорода у дна понижается в результате активной деструкции детрита, поступающего на дно в эти периоды.



**Рис. 4.** Рассчитанное вертикальное распределение содержания кислорода на приплотинном участке (отсек I-4) водохранилища при проектном НПУ 2.8 м на 15 апреля (сплошная линия), 15 мая (штрихпунктирная линия), 15 августа (пунктирная линия) и 15 октября (точки).

*Влияние биогенной нагрузки на развитие фитопланктона в Багаевском водохранилище*

Кроме биомассы, поступающей из Цимлянского водохранилища, на развитие фитопланктона в Багаевском водохранилище оказывает влияние биогенная нагрузка проектируемого водохранилища. Как уже отмечалось, гидрохимический режим Нижнего Дона в значительной степени определяется режимом сброса химических веществ из Цимлянского водохранилища. Однако в нижнем бьефе Цимлянского водохранилища имеются дополнительные источники биогенных веществ. Это, в первую очередь, р. Северский Донец, впадающая в приплотинный плес Кочетовского гидроузла, а также впадающие непосредственно в Багаевское водохранилище реки Сал и Маныч. Дополнительным источником биогенов могут быть также коммунальные сбросы населенных пунктов.

Для оценки влияния роста биогенных нагрузок на развитие фитопланктона проведена серия сценарных расчетов. Первый сценарий преду-

**Таблица 4.** Прирост (%) средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона при изменении притока биогенов в водохранилище

| Кратность изменения поступления биогенов | Через Кочетовский г/у |           | С бокового водосбора |           |
|--|-----------------------|-----------|----------------------|-----------|
|  | НПУ 2.0 м             | НПУ 2.8 м | НПУ 2.0 м            | НПУ 2.8 м |
| 0.5                                      | -13                   | -17       | -0.2                 | -0.3      |
| 1  | 0                     | 0         | 0                    | 0         |
| 2  | 23                    | 30        | 0.4                  | 0.6       |
| 3  | 42                    | 60        | 0.7                  | 1.2       |
| 5  | 71                    | 122       | 1.5                  | 1.5       |

смастривал изменения концентраций минерального азота и фосфора в воде, поступающей в проектируемое водохранилище через Кочетовский г/у, второй – в воде, поступающей с частного бокового водосбора Багаевского водохранилища. Расчеты показали высокую чувствительность фитопланктона Багаевского водохранилища к изменениям величины сброса биогенов через Кочетовский г/у (табл. 4). При повышении НПУ водохранилища с 2.0 до 2.8 м увеличение притока биогенов по главной реке приводит к существенно большему росту в нем средневегетационных величин биомассы фитопланктона (на 15–20% при существующем притоке биогенов); причем, в большей степени это характерно для синезеленых водорослей. При изменении величины поступления биогенов с частного водосбора водохранилища прогнозируемое увеличение биомасс фитопланктона в Багаевском водохранилище незначительно ( $\leq 2\%$ ). Это обусловлено малой долей поступления биогенов, поступающих с бокового водосбора, в балансе биогенных веществ будущего водохранилища по сравнению с их поступлением через Кочетовский г/у.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования приводят к следующим выводам.

Режим биогенных веществ участка реки в пределах проектируемого водохранилища находится в прямой зависимости от их поступления из Цимлянского водохранилища. Развитие биомассы фитопланктона Багаевского водохранилища определится, в основном, поступлением биогенов через Кочетовский г/у, а влияние биогенной нагрузки с бокового водосбора незначительно. Повышение НПУ водохранилища на 0.8 м приведет к росту средней за вегетационный сезон биомассы фитопланктона на 15–20%.

На состав и количественное развитие альгофлоры Нижнего Дона доминирующее влияние оказывает Цимлянское водохранилище. Создание Багаевского водохранилища с НПУ 2.0 м приведет к незначительному увеличению в створе его гидроузла средних значений биомассы фитопланктона по сравнению с существующими условиями. В зависимости от погодных условий оно составит для диатомовых водорослей 2–5, для синезеленых водорослей 4–7%. Максимальные среднесуточные значения биомассы водорослей в поверхностном слое увеличатся для диатомовых на 1–5, для синезеленых – на 1–3%. В нижний бьеф гидроузла будет поступать вода с содержанием синезеленых водорослей в среднем на 1–5% больше, чем при существующих условиях.

При НПУ водохранилища 2.8 м увеличение биомассы фитопланктона будет существенно

больше: для средних значений биомассы диатомовых водорослей – на 13–23, максимальных – на 20%, в нижний бьеф в период “цветения” будет поступать вода с повышенной на 7–19% биомассой водорослей. Среднее содержание синезеленых водорослей увеличится на 16–26, максимальное – на 14–17%, их содержание в нижнем бьефе возрастет на 13–21% в зависимости от погодных условий вегетационного сезона.

Результаты расчетов показывают также, что различия метеорологических условий вегетационных сезонов оказывают незначительное влияние на конечный результат продукционных процессов в пределах рассматриваемого участка Нижнего Дона как в существующих условиях, так и при условии создания Багаевского водохранилища. Быстрая смена воды на участке мешает особенностям погоды оказывать существенное влияние на интенсивность развития фитопланктона.

Диагностические расчеты показали, что влияние Новочеркасской ГРЭС на продукционные процессы в пределах рассматриваемого участка Нижнего Дона незначительно и в средний по метеоусловиям год составит ~3% для весеннего диатомового комплекса и 1.4% для синезеленых водорослей. При создании проектируемого водохранилища это влияние усиливается, но тоже крайне незначительно: средняя биомасса диатомовых водорослей снизится на 4–5, а синезеленых увеличится на 1–2% по сравнению с аналогичными условиями, но при отсутствии сброса в водохранилище теплых вод ГРЭС.

Создание водохранилища с НПУ 2.0 м приводит к снижению средних значений концентрации  $PO_4$ ,  $NH_4$  и  $NO_3$  в водохранилище соответственно на 5, 1 и 6% в жаркий год и на 7, 5 и 14% в холодный год по сравнению с существующими условиями. Повышение НПУ водохранилища с 2.0 до 2.8 м приведет к еще большему снижению средних концентраций биогенных веществ как в самом водохранилище, так и в его нижнем бьефе соответственно на 16, 29 и 42% по сравнению с существующими условиями.

Колебания разницы концентраций в поверхностных и придонных слоях объясняются чередованием условий полного вертикального перемешивания водной толщи и штилевых условий погоды, при которых стратификация устанавливается очень быстро. С подъемом уровня при создании Багаевского гидроузла диапазон вертикальных различий концентраций биогенных веществ увеличивается для всех рассматриваемых веществ. Однако это увеличение не настолько существенно, чтобы повлиять на экологическую ситуацию в водохранилище.

В период интенсивной вегетации фитопланктона в водохранилище возникает слабая верти-

кальная стратификация растворенного кислорода, при которой, однако, зоны аноксии не образуются при всех расчетных сценариях (проектные уровни, гидрометеорологические условия года). Отсутствие аноксии в Багаевском водохранилище объясняется благоприятными условиями гидродинамического перемешивания водной массы водохранилища при высокой его проточности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аксенова Е.И.* Фитопланктон Нижнего Дона в условиях зарегулированного стока. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л.: ГОСНИОРХ, 1970. 20 с.
2. *Аксенова Е.И., Труфанова З.А.* Фитопланктон Дона и Кубани в условиях меняющегося режима // Тр. ВНИРО. Т. СШ. 1974. С. 59–65.
3. *Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д.* Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищ. пром-сть, 1979. 288 с.
4. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. Эдельштейна К.К. М.: Перо, 2015. 286 с.
5. *Голоколенова Т.Б.* Современный эколого-флористический состав фитопланктона Цимлянского водохранилища // Современные проблемы альгологии: Материалы междунар. науч. конф. и VII Школы по морской биологии. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2008. С. 100–102.
6. *Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Пуклаков В.В.* Моделирование развития фитопланктона в Рыбинском водохранилище // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление, 2015. № 1. С. 32–40.
7. *Харьковский В.М.* Гидрохимические аспекты Нижнего Дона // Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Новосибирск: Сибпринт, 2013. С. 64–69.
8. Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути решения / Отв. ред. Матишов Г.Г. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. 216 с.
9. *Эдельштейн К.К.* Водные массы долинных водохранилищ. М.: МГУ, 1991. 176 с.
10. *Эдельштейн К.К., Гречушников М.Г., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В.* Диагностическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилищах // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 4. С. 437–451.