

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛАНКТОННЫХ БИОЦЕНОЗОВ АНТРОПОГЕННО НАГРУЖЕННОГО ВОДОЕМА

© 2024 г. Е. Ю. Афолина^{а, *}, Н. А. Ташлыкова^а

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения
Российской академии наук, Чита, Россия*

**e-mail: kataf@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2023 г.

После доработки 28.05.2023 г.

Принята к публикации 07.06.2023 г.

Представлены результаты многолетних исследований водохранилища-охладителя Харанорской ГРЭС (Забайкальский край), условно разделенных на четыре периода в зависимости от нарастания мощности электростанции. Определены этапы развития фито- и зоопланктона, обусловленные влиянием техногенных и биотических факторов. Показана реакция планктонных сообществ на изменение тепловой нагрузки. Периоды интенсивной вегетации водорослей и массового развития беспозвоночных чередуются со значительным спадом численности и биомассы гидробионтов, что свидетельствует о нестабильном состоянии формирующейся техноэкосистемы водоема-охладителя.

Ключевые слова: техноэкосистема, водоем-охладитель, факторы среды, трансформация, фитопланктон, зоопланктон

DOI: 10.31857/S0320965224030012, EDN: ZQVBCJ

ВВЕДЕНИЕ

Водоем-охладитель — особый самостоятельный тип водного объекта, существенно отличающийся от всех типов естественных водоемов (Суздалева, Безносков, 2000), входит в состав сложной техноэкосистемы, представляющей собой комплекс взаимосвязанных биотических, абиотических и техногенных элементов (Протасов, 2014). В водоеме-охладителе существуют хорошо выраженные градиенты различных факторов, что позволяет исследовать многие общегидробиологические закономерности (Протасов и др., 2011; Lazareva et al., 2014). Повышенная относительно природных водоемов температура воды позволяет использовать их в качестве модельных объектов при прогнозировании изменений климата (Безносков, Суздалева, 2004; Лазарева, Соколова, 2013; De Senerpont Domis et al., 2013; Jeppesen et al., 2015).

Сукцессионное развитие экосистем техногенных и природных водоемов принципиально отличается, что обусловлено рядом специфических особенностей техногенных водоемов (Протасов и др., 2011), и не зависит от географического положения, морфометрии и происхождения водоема, а определяется изменениями в техногенной нагрузке, связанной с характером эксплуатации и водоснабжения энергетических станций (Без-

носков, Суздалева, 2005). Если для природных систем характерны поступательные изменения, приводящие к устойчивому климаксному состоянию, свойственному данной ландшафтно-климатической зоне, то в техногенных водоемах периоды интенсивных сукцессионных процессов чередуются с периодами относительной стабилизации (Суздалева, 2002). Состояние техногенного псевдоклимакса может сохраняться продолжительное время, пока относительно стабильными будут технические условия. Изменение этих условий приводит к прекращению существования “техногенных” сообществ, которые в результате сукцессионных процессов преобразуются в другие сообщества, обладающие уже иным составом и структурой (Мордухай-Болтовской, 1975; Протасов, 2014). При этом следует учитывать, что техногенные факторы накладываются на изменяющиеся климатические условия (Novoselova et al., 2020).

Водоохранилища-охладители — это принципиально иное экологическое явление, нуждающееся в определении специфики сукцессионного формирования с точки зрения фундаментальных знаний в области экологии и гидробиологии (Суздалева, 2002). Объект исследований — расположенное в условиях резко континентального климата наливное водохранилище-охладитель Харанорской ГРЭС (Забайкальский край). Ма-

лые водохранилища, не играющие большой роли в общем балансе пресных вод биосферы, не менее важны, чем крупные (как объекты теплоэлектростанций, объекты рекреации и пр.). Рассмотрение процесса превращения водных масс одного типа в другой в конкретных условиях среды, которые отличаются набором признаков, свойственных определенной ландшафтной зоне, а также изучение особенности формирования и развития биоты степного водохранилища-охладителя, интересно и актуально.

Цель работы — на основе многолетних наблюдений определить трансформацию планктонных биоценозов антропогенно нагруженного водоема. Многолетние исследования сообществ гидробионтов являются необходимым и важным для целей экологического мониторинга и прогноза состояния экосистем водохранилищ при различных вариантах его антропогенной нагрузки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований. Харанорская ГРЭС — тепловая электростанция в Забайкальской энер-

госистеме мощностью 665 МВт. Станция вырабатывает >2.7 млрд кВт \times ч/год электроэнергии. Фактическая тепловая мощность достигает ~ 134 тыс. Гкал. Водоохранилище-охладитель ХГРЭС ($50^{\circ}51'12''$ с.ш.; $115^{\circ}40'41''$ в.д.) представляет собой наливной водоем прудового типа, образованный путем обвалования дамбами участка поймы р. Онон в месте впадения в нее р. Турга. Площадь водного зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ, 574 м Балтийской Системы (БС)) 4.1 км², объем водной массы 15.6 млн м³, периметр 8.6 км, средняя глубина 3.8 м. Заполнение и подпитка водоема в период открытой воды происходит за счет подачи воды из р. Онон по водоподводящему каналу, в период ледостава — из дренажного канала. Вода из пруда на станцию поступает через водозаборный канал и сбрасывается в водосбросный канал. Система технического водоснабжения станции смешанная (прямоточно-оборотная летом и полностью оборотная зимой) (рис. 1).

Периоды исследований. Исследования водохранилища проводили в течение различных периодов функционирования ГРЭС: период I — введение в эксплуатацию и работа энергоблока № 1

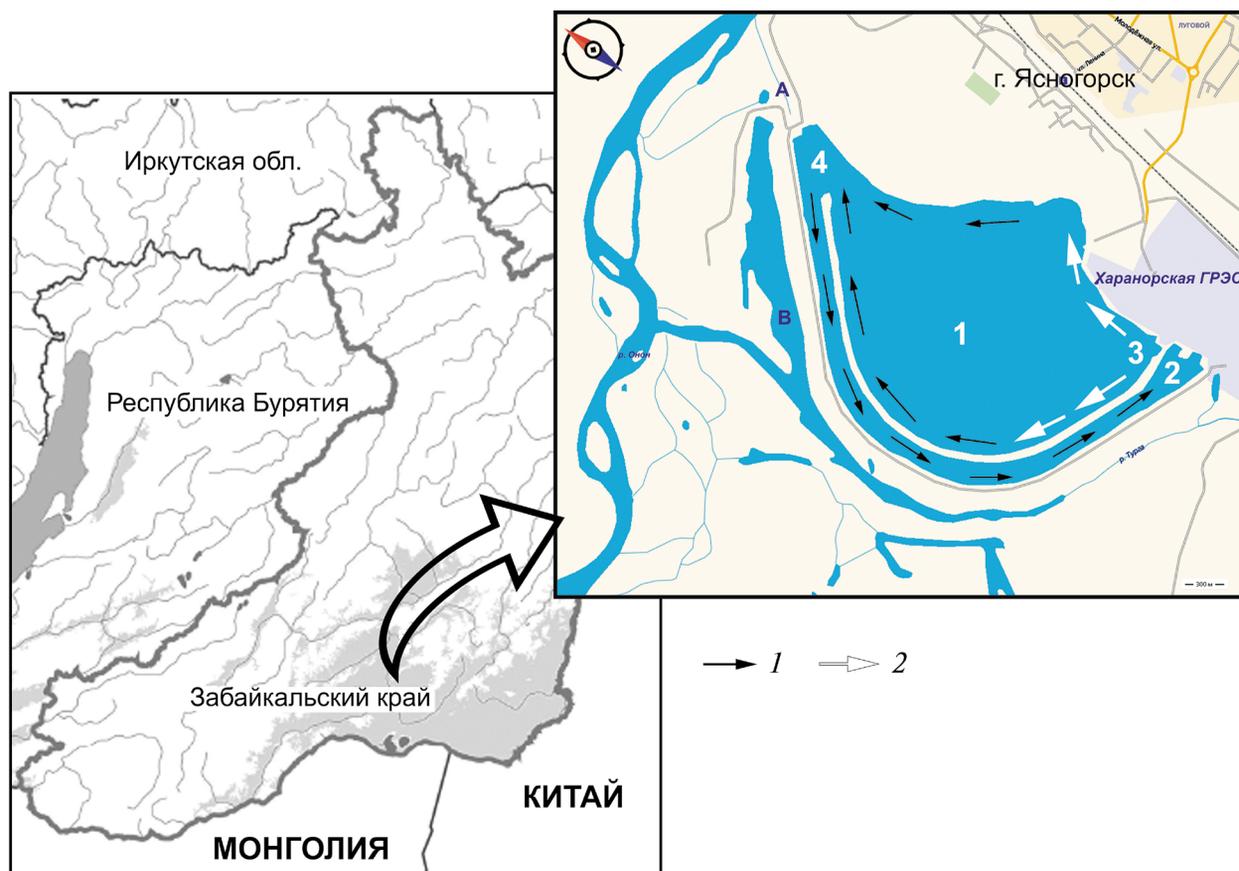


Рис. 1. Схема водохранилища-охладителя Харанорской ГРЭС. А — водоподводящий канал, В — дренажный канал. Станции отбора проб: 1 — центр, 2 — водозаборный канал, 3 — водосбросный канал, 4 — береговая насосная станция. 1 — охлаждение воды, 2 — подогретые воды.

(мощность 215 МВт) — 1995–1997 гг.; II — ЭБ № 2 (215 МВт) — 2001–2003 гг.; III — ЭБ № 3 (225 МВт) — 2012–2013 гг.; IV — переаттестация мощности ЭБ № 3 до 235 МВт — 2019–2021 гг.

Уровень воды в первые годы формирования водохранилища был крайне неустойчивым. Регистрировали отметки как ниже уровня мертвого объема (572.5 м БС), так и выше форсированного подпорного уровня (574.3 м БС). С 2010 г. среднегодовые отметки сохраняются на уровне НПУ (рис. 2а).

Разница **температуры воды** по акватории водоема варьировала от 0.2–2.7°C в периоде I до 3.8–8.5°C в периоде IV (рис. 2б). Самая прогретая часть — место выпуска теплового потока, который в основной своей массе движется в поверхностном метровом слое. За счет широкого выпуска, невысокой скорости течения и ветро-волновых процессов достигается хорошее перемешивание, что приводит к довольно высокой температуре придонных слоев. В связи с мелководностью разница в температурах по глубине

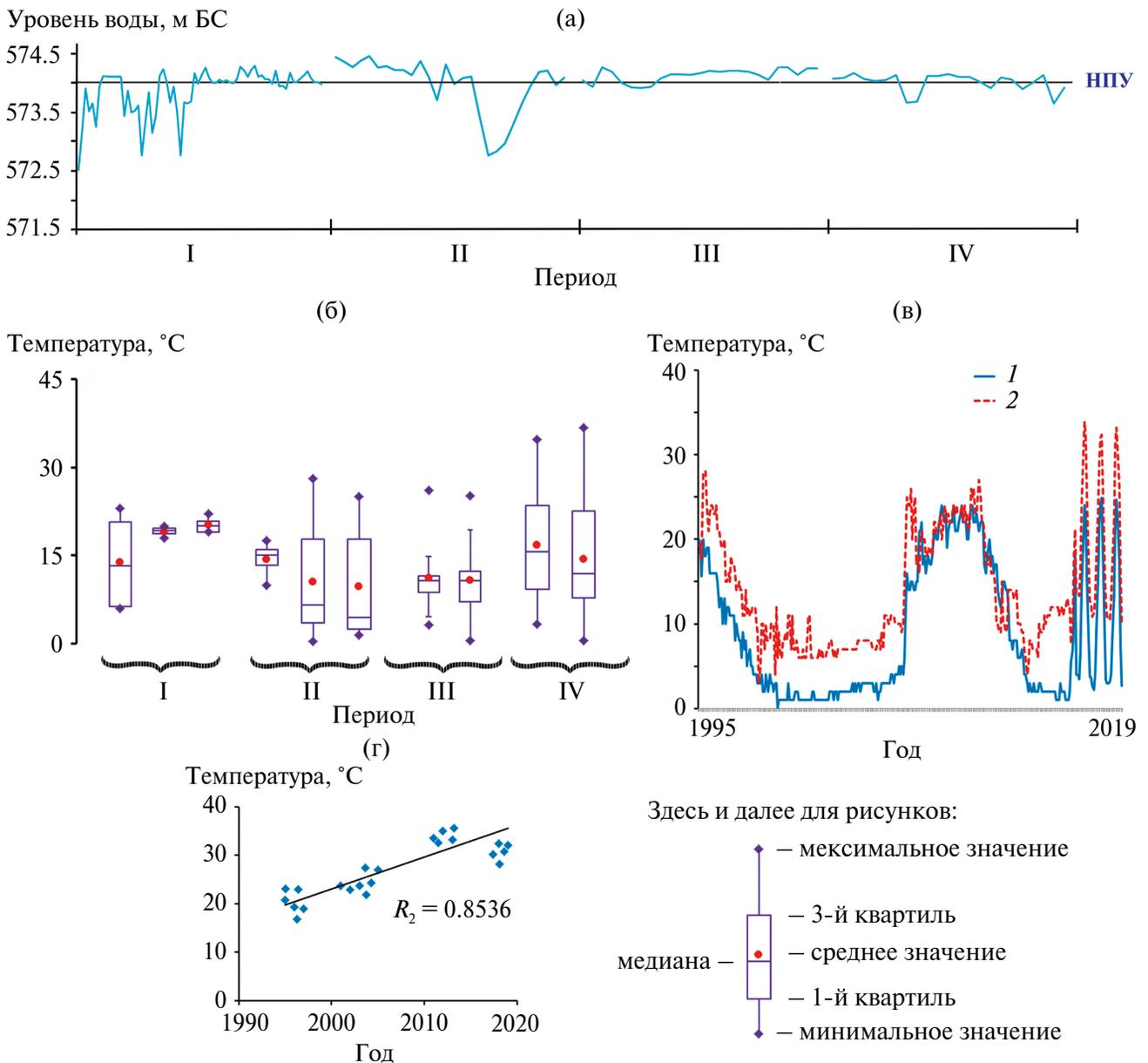


Рис. 2. Динамика среднемесячного уровня воды (а, м БС) и среднегодовой температуры воды (б) в разные периоды исследований, изменения температуры воды на входе (1) и выходе (2) из конденсатора (в), многолетняя динамика температуры воды в июле–августе на ст. 3 (г).

невелика (0.1–0.5°C весной и осенью и 1.6–5.8°C летом). Увеличение мощности станции способствовало увеличению разницы температур между закачиваемой (вход) к циркуляционным насосам водой и сбрасываемой после технологического процесса (выход) (от 5.3–7.6°C до 8.4–11.5°C) (рис. 2в). В многолетнем плане прослеживалось увеличение температуры в период наибольшего прогревания вод (июль–август) в районе сброса вод на $\geq 10^\circ\text{C}$ (рис. 2г). Выявлены отрицательные корреляционные зависимости с прозрачностью ($r = -0.97$, $p = 0.008$), уровнем воды ($r = -0.93$, $p = 0.05$) и положительная — с водообменом ($r = 0.89$, $p = 0.05$).

Сброс подогретых вод в водохранилище способствовал увеличению вегетационного сезона за счет более раннего прогрева весной (вторая декада апреля) и более позднего замерзания осенью (третья декада октября).

Водообмен. С начала работы станции увеличился объем перекачиваемой воды (от 161 520 тыс. до 509 305 тыс. м³/год) и интенсивность внутреннего водообмена (от 10 до 32–35 раз/год). Отмечена положительная корреляция с прозрачностью воды ($r = 0.87$, $p = 0.01$).

Наибольшие **глубины** сосредоточены в районе береговой насосной станции и центре водоема, в разные годы наибольшие глубины отбора проб были 1.8–5.8 м. Достоверных корреляционных зависимостей не выявлено.

Прозрачность воды изменялась от 0.5–1.0 (период I) до 0.7–4.5 м (период IV). Низкие показатели регистрировали в июле–августе, высокие — в октябре.

По **химическому составу** воды гидрокарбонатно-натриевые слабощелочные. В многолетнем аспекте наблюдали увеличение концентрации растворенного кислорода (от 6–10 до 9.6–14.2 мг/л) и общей минерализации (от 161.8–163.2 до 223–229 мг/л), за счет увеличения гидрокарбонатов, кальция, калия. Отмечено увеличение показателя N/P от 5 до 20 вследствие повышения концентраций нитритного и нитратного азота и снижения фосфора и аммонийного азота (Андрюк и др., 2005; Афонин и др., 2014; Афолина и др., 2020; Цыбекмитова, Матвеева, 2020).

Сбор и обработка проб. Многолетние исследования охватили период с 1995 по 2021 г. Планктонные пробы собирали на четырех станциях водохранилища ежемесячно в течение вегетационного сезона (с мая по октябрь) (рис. 1).

Пробы фитопланктона отбирали батометром Паталаса в приповерхностном и придонном слоях, зоопланктона — тотально сетью Джеди (средняя модель, ячея сита 64 мкм). Лабораторную обработку фиксированных 4%-ным раствором формалина образцов проводили по общеприня-

тым методам (Киселев, 1969; Садчиков, 2003). Биомассу водорослей определяли по объему отдельных клеток или колоний (Садчиков, 2003). Данные по биомассе зоопланктона получали путем определения индивидуальной массы организмов с учетом их размера (Ruttner-Kolisko, 1977; Балушкина, Винберг, 1979).

Анализ данных. Ретроспективный анализ изменения фитопланктона за 1995–1997 и 2001–2003 гг. представлен согласно данным З.П. Оглы (1997) и Г.И. Поповской и др. (Андрюк и др., 2005).

Для анализа структуры фито- и зоопланктона использовали индексы видового разнообразия — видовое богатство или число видов (n), Шеннона–Уивера по численности (H'_n), Симпсона (D'_s) и Пиелу (e) (Мэггаран, 1992). Значение отдельных видов в формировании сообщества рассматривали по его встречаемости в пространстве (pF), частоте доминирования (DF) и порядку доминирования (Df) (Кожова, 1970). К доминирующим относили виды, численность которых была $\geq 10\%$ общего количества фитопланктона (Корнева, 2015) и $\geq 5\%$ общей численности зоопланктона (Федоров, Гильманов, 1980). Таксономическую и размерно-массовую структуры зоопланктона оценивали соответственно по соотношению Rotifera/Copepoda/Cladocera по численности ($N\%_{\text{Rot/Cop/Clad}}$), биомассе ($B\%_{\text{Rot/Cop/Clad}}$) и средней индивидуальной массе зоопланктона (w_{cp}) (Андрюкова, 1996). При изучении временных сукцессий фито- и зоопланктона рассчитывали величины общей численности (N_{tot}) и общей биомассы (B_{tot}), вариации численности $N_{\text{max}}/N_{\text{min}}$ и биомассы $B_{\text{max}}/B_{\text{min}}$ (Крючкова, 1985).

При установлении корреляционных зависимостей между параметрами использовали коэффициент корреляции Пирсона (r). Для проверки достоверности разницы средних значений при анализе количественных данных применяли параметрический метод Стьюдента при уровне значимости $p = 0.05$. Вклад независимых переменных в вариации зависимых оценивали по коэффициенту детерминации (R^2), силу влияния фактора — по критерию Фишера (F). При необходимости ряды данных сглаживали методом осреднения, который отбрасывает случайные вариации. При анализе использовали среднеарифметическое значение \bar{x} и ошибку средней величины $S_{\bar{x}}$. Материал обрабатывали при помощи пакета прикладных программ для анализа данных MS Excel, XLStat.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

Видовое богатство фито- и зоопланктона

Общий список фитопланктона насчитывал 206 таксонов рангом ниже рода (Cyanophyta/

Суанобактерия (28 таксонов – 13% общего числа таксонов), Chrysophyta (17 – 8%), Bacillariophyta (46 – 22%), Cryptophyta (4 – 2%), Dinophyta (6 – 3%), Charophyta (14 – 7%), Chlorophyta (87 – 43%), Euglenophyta (4 – 2%). В многолетнем аспекте видовое богатство фитопланктона снижалось ($R^2 = 59\%$, $F = 28$).

Структурообразующий комплекс фитопланктона за период исследований насчитывал 11 таксонов (*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault 1886, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák 1988, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing 1846, *Dolichospermum scheremetieviae* (Elenkin) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, nom. inval. 2013, *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen 1979, *Fragilaria radians* (Kützing) D.M. Williams & Round 1987, *Asterionella formosa* Hassall 1850, *Gyrosigma spenceri* var. *nodiferum* (Grunow) Cleve 1894, *G. acuminatum* (Kützing) Rabenhorst 1853, *Dictyococcus pseudovarians* Korshikov 1953, *Scenedesmus ellipticus* Corda 1835) и изменялся от хлорококково-диатомового (период I) до цианобактериально-диатомового (периоды II и III) и до диатомово-цианобактериального с участием зеленых водорослей (период IV).

В отделе Chlorophyta чаще других встречались *Oocystis borgei* J.W. Snow 1903, *Pseudopediastrum boryanum* и *Tetrastrum komarekii* Hindák 1977 ($pF = 25\text{--}50\%$), *Oocystis lacustris* Chodat, 1897 и *Scenedesmus ellipticus* ($pF > 50\%$). У Суанобактерия превалировал *Aphanizomenon flos-aquae* ($pF = 75$ и $Dt = 85$). Для Bacillariophyta отмечено высокое значение pF (25–75) и Dt (45–85).

Всего в зоопланктоне зарегистрировано 109 таксонов рангом ниже рода, из них 62 вида и подвида Rotifera (57%), 29 видов Cladocera (27%) и 18 – Сорепода (16%). Видовое богатство зоопланктона в многолетнем аспекте снижалось ($R^2 = 72\%$, $F = 39$).

Виды *Filinia longiseta* (Ehrenberg, 1834), *Brachionus quadridentatus quadridentatus* Hermann, 1783, *Keratella cochlaearis* (Gosse, 1851), *K. quadrata* (Müller, 1786), *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, *Daphnia galeata* G.O. Sars, 1864, *Bosmina longirostris* (O.F. Müller, 1785), *Heterocope appendiculata* G.O. Sars, 1863, *Cyclops vicinus* Uljanin, 1875, *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Thermocyclops crassus* (Fischer, 1853) регистрировали во все периоды и в течение вегетационных сезонов. Наиболее часто встречающимися видами ($pF \geq 50$) были *Daphnia galeata*, *Bosmina longirostris*, *Cyclops vicinus*, *Thermocyclops crassus*. Виды *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Daphnia galeata*, *Bosmina longirostris*, *Cyclops vicinus*, *Thermocyclops crassus* чаще других входили в состав доминирующего комплекса ($DF \geq 50$) и были наиболее значимыми ($Dt \geq 50$). Отдельные виды превалировали однажды и короткий отрезок времени. Так, всплеск

численности *Conochilus unicornis* Rousset, 1892, *Ceriodaphnia quadrangula* O.F. Müller, 1785, *Acanthodiptomus denticornis* (Wierzejski, 1887) отмечали летом 1995–1996 гг., *Euchlalis dilatata* Ehrenberg, 1832 – летом 1997 г., *Brachionus angularis* Gosse, 1851 – весной 2001 г., *Bosminopsis deitersi* Richard, 1895 – осенью 2001 г., *Bipalpus hudsoni* (Imhof, 1891) и *Synchaeta pectinata* Ehrenberg, 1832 – осенью 2019 г., *Ascomorpha ecaudis* Perty, 1850 – летом 2021 г. За весь период исследований структурообразующий комплекс зоопланктона формировали 24 вида.

Изменение состава и структуры фито- и зоопланктона

Период I. В составе альгофлоры выявлен 45–51 таксон водорослей рангом ниже рода. Численность изменялась от 0.032 до 20.4 млн кл./л (в среднем – 11.5 ± 7 млн кл./л), биомасса – от 0.047 до 7.5 г/м³ (4.8 ± 2.7 г/м³). Доминировали *Gyrosigma spenceri* var. *nodiferum*, *G. acuminatum*, *Dictyococcus pseudovarians* и *Asterionella formosa* (рис. 3, 4).

В составе зоопланктона отмечали 16–37 таксонов, всего 67. Значения количественных показателей изменялись в пределах 17.42–155.32 тыс. экз./м³ и 0.63–7.30 г/м³ (в среднем – 89.03 ± 26.36 тыс. экз./м³ и 2.83 ± 1.07 г/м³). Структурообразующий комплекс формировали 3–6 видов, всего 11. Основу численности и биомассы формировали клadoцеры ($N\%_{\text{clad}} = 43 \pm 7$ и $B\%_{\text{clad}} = 56 \pm 6$). Доминировали *Daphnia galeata* ($DF = 98$), *Asplanchna priodonta* ($DF = 67$), *Thermocyclops crassus* ($DF = 65$). Превалирование крупных форм организмов определило наибольшее значение $w_{\text{cp}} = 0.076 \pm 0.038$ г (рис. 3). Согласно значениям индексов разнообразия ($H_n = 2.32 \pm 0.11$, $D_s = 0.75 \pm 0.03$, $e = 0.64 \pm 0.03$), трофность водоема соответствовала мезотрофному типу с развитием разнообразного и с высоким уровнем выравненности зоопланктоценоза (рис. 4).

Период II характеризовался массовой вегетацией *Aphanizomenon flos-aquae*, в августе 2001 г. его численность доходила до 21.7 млн кл./л (69% N_{tot}), биомасса – до 119.5 г/м³ (98% B_{tot}). Количественные показатели достигали 0.05–31.4 млн кл./л (в среднем 3.1 ± 6.2 млн кл./л) и 0.07–122 г/м³ (10.52 ± 22.63 г/м³). Доминировали также *Snowella lacustris*, *Dolichospermum scheremetieviae* и *Microcystis aeruginosa*. Общее количество таксонов изменялось от 84 до 119 (рис. 3, 4).

Зоопланктон характеризовался наибольшим видовым богатством (78 таксонов, при варьировании от 14 до 34) и обилием (533.83 ± 190.38 тыс. экз./м³ при диапазоне 40.96–2011.56 тыс. экз./м³ и 1.59 ± 0.29 г/м³ ($0.43\text{--}3.52$ г/м³)). Доминирующий комплекс представляли 1–5 видов, общим

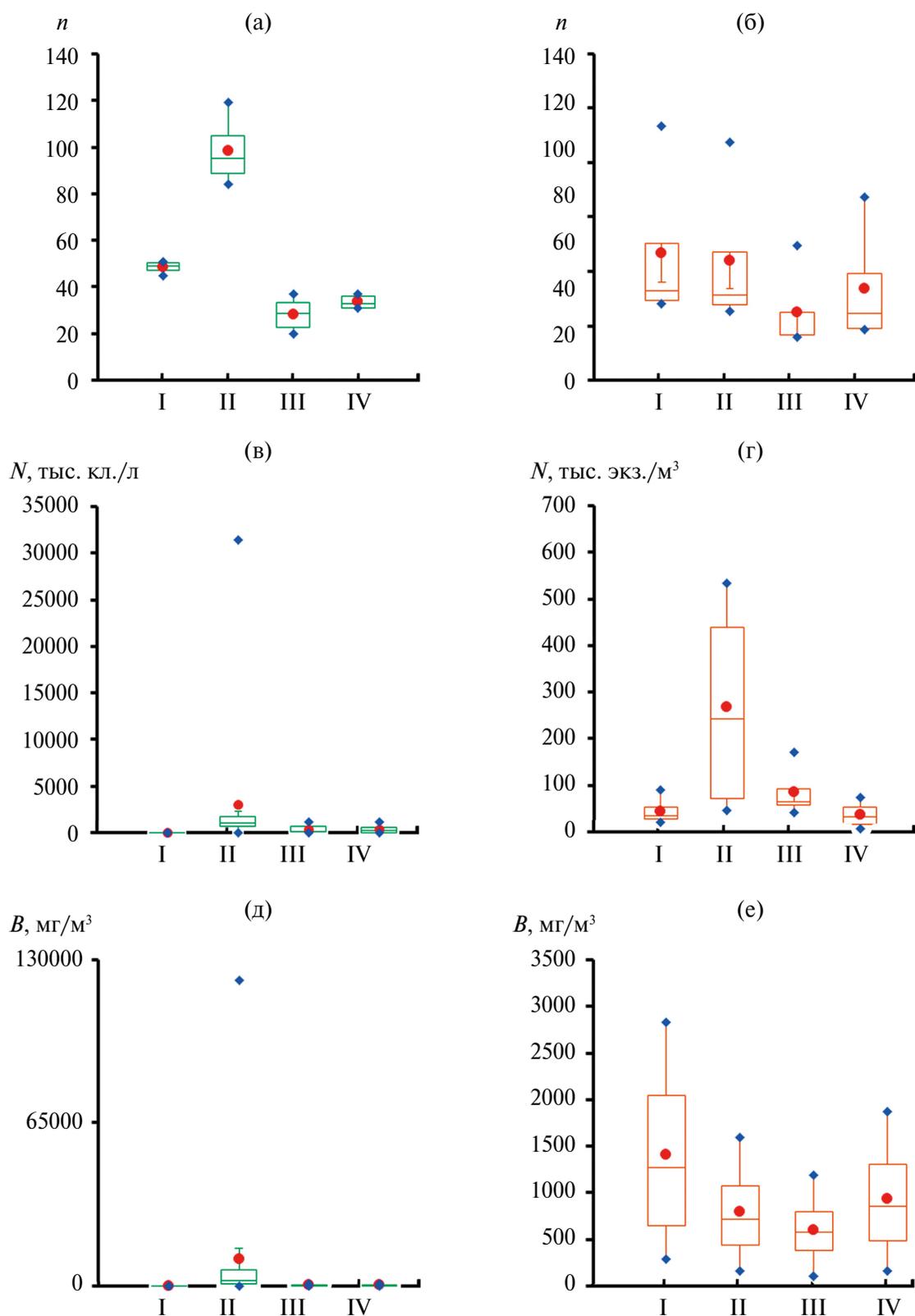


Рис. 3. Изменение структурных показателей фитопланктона (а, в, д) и зоопланктона (б, г, е) водохранилища в разные периоды исследований (I–IV): а, б — число видов, в, г — численность, д, е — биомасса.

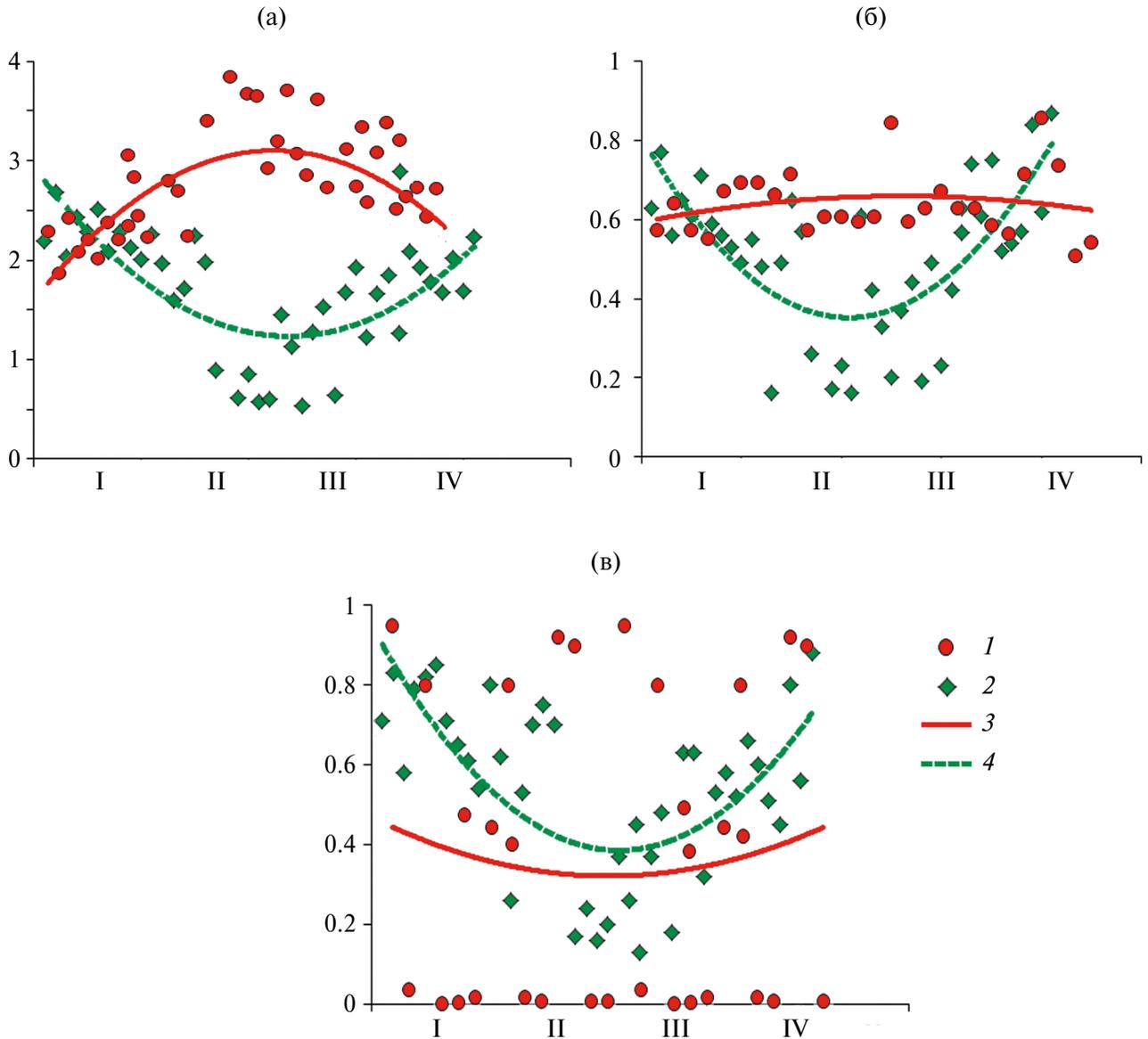


Рис. 4. Изменение индексов разнообразия Шеннона–Уивера (а), Пиелу (б), Симпсона (в) фитопланктона (1, 3) и зоопланктона (2, 4) водохранилища в разные периоды исследований (I–IV).

числом 13. Основными элементами ротаторного зооценоза ($N\%_{Rot} = 48 \pm 11$) были *Kellicottia longispina* ($DF = 64$) и *Bosmina longirostris* ($DF = 57$). Основу биомассы создавали по-прежнему ветвистоусые ракообразные ($B\%_{Clad} = 52 \pm 9$). Массовое развитие мелкоразмерных форм обусловило наименьшее $w_{cp} = 0.010 \pm 0.003$ г (рис. 3). По показателям ($H_n = 1.74 \pm 0.19$, $D_s = 0.51 \pm 0.07$, $e = 0.47 \pm 0.05$) водохранилище классифицировали как эвтрофное с признаками экстремальных экологических условий в 2003 г. ($H_n < 1$) (рис. 4).

Период III. В фитопланктоне отмечали низкую видовую насыщенность (15 ± 10 видов в пробе). Всего обнаружено 64–74 таксона. Общая чис-

ленность сократилась до 0.06–0.9 млн кл./л (при варьировании 0.6 ± 0.41 млн кл./л), биомасса — до 0.01–0.81 г/м³ (0.24 ± 0.27 г/м³). Преобладали *Aphanizomenon flos-aquae*, виды рода *Oscillatoria*, *Fragilaria radians*. Значения индексов разнообразия ($H_n = 2.29 \pm 1.32$, $D_s = 0.40 \pm 0.23$, $e = 0.54 \pm 0.23$) указывают на упрощение структуры и среднее биоразнообразие альгофлоры (рис. 3, 4).

В зоопланктоне также отмечали значительное сокращение видового богатства (27 видов, от 8 до 19), вследствие почти полного выпадения коловраток и калянид. При этом показатели $N_{tot} = 170.0 \pm 48.72$ тыс. экз./м³ (65.13 – 375.90 тыс. экз./м³) и $B_{tot} = 1.19 \pm 0.08$ г/м³ (0.98 – 1.48 г/м³)

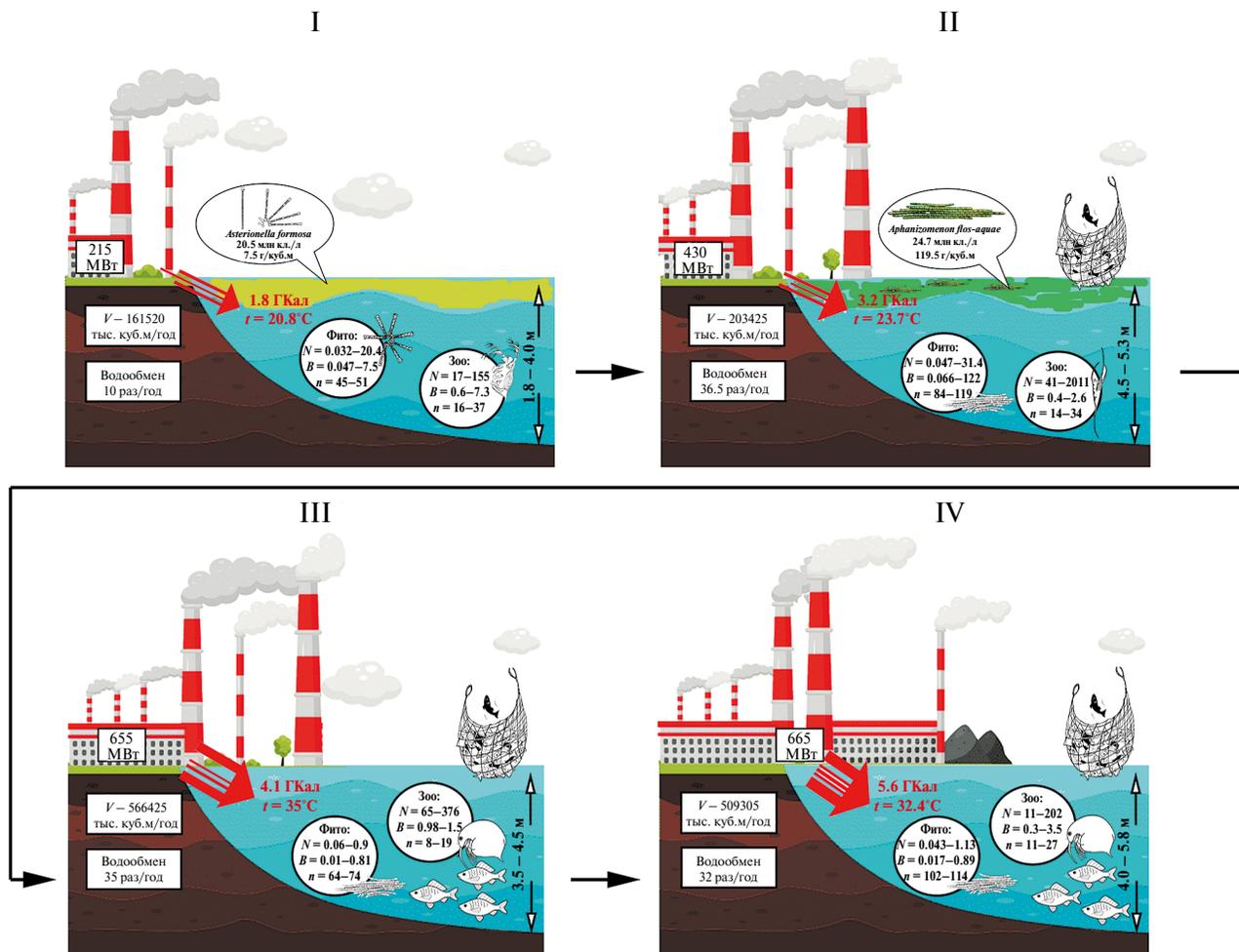


Рис. 5. Концептуальная модель экологической модуляции планктонных биоценозов водохранилища-охладителя. I–IV — периоды исследований, V — объем перекачиваемой воды, t — температура воды, N — численность, B — биомасса, n — число видов.

оставались достаточно высокими. Число доминантов сократилось до 1–3, всего 9. Основу зоопланктона формировали Cladocera ($N\%_{\text{Clad}} = 51 \pm 12$ и $B\%_{\text{Clad}} = 56 \pm 11$) с преобладанием *Bosmina longirostris* ($DF = 91$). Показатель w_{cp} не изменился (0.011 ± 0.003 г) (рис. 3). Согласно индексам разнообразия ($H_n = 1.59 \pm 0.13$, $D_s = 0.52 \pm 0.05$, $e = 0.53 \pm 0.08$), водохранилище отнесено к эвтрофному типу с преобладающим доминированием одного вида (рис. 4).

Период IV характеризовался повышением видового разнообразия планктонных организмов. Число таксонов водорослей достигало 102–114. Общая численность изменялась в пределах 0.04–1.13 млн кл./л (в диапазоне 0.30 ± 0.29 млн кл./л), биомасса — 0.02–0.89 г/м³ (0.30 ± 0.25 г/м³). Состав доминантов определяли 7 видов. В массе вегетировали *Aphanizomenon flos-aquae*, *Snowella lacustris*, *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère 2001, *Stephanodiscus hantzschii* Grunowin Cleve & Grunow

1880, *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller 1882, *Asterionella formosa*, *Fragilaria radians*. Значения индексов разнообразия ($H_n = 2.91 \pm 0.49$, $D_s = 0.29 \pm 0.1$, $e = 0.58 \pm 0.06$) указывают на полидоминантность сообщества.

В зоопланктоне отмечали появление новых видов Rotifera и Calanoida. Однако показатель N_{tot} был наименьшим (74.33 ± 25.47 тыс. экз./м³, варьирование 10.52–201.65 тыс. экз./м³) при почти неизменной B_{tot} (1.36 ± 0.48 г/м³, варьирование 0.28–3.46 г/м³). Общее число доминантных видов стало наибольшим (14 при варьировании от 2 до 6 видов). Доля участия кладоцер возросла ($N\%_{\text{Clad}} = 57 \pm 7$ и $B\%_{\text{Clad}} = 59 \pm 8$). *Bosmina longirostris* ($DF = 74$) сохранила свой доминирующий статус. Показатель w_{cp} увеличился до 0.021 ± 0.005 г (рис. 3). Значения индексов ($H_n = 1.92 \pm 0.07$, $D_s = 0.64 \pm 0.05$, $e = 0.67 \pm 0.05$) указывают на эвтрофный тип водоема с развитием монодоминантного сообщества (рис. 4).

На основе результатов многолетних исследований представлена концептуальная модель (рис. 5), иллюстрирующая трансформацию планктонных биоценозов в антропогенно нагруженном водоеме вследствие увеличения мощности станции (от 215 до 665 МВт), тепловой нагрузки (от 1.8 до 5.6 Гкал), объема перекачиваемой воды (от 161 520 тыс. до 509 305 тыс. м³/год), водообмена (от 10 до 32–35 раз/год), температуры воды (от 21 до 32–35°C), изменения глубины и проведения биомелиоративных мероприятий. Периоды I–II исследований характеризовались развитием разнообразных и обильных планктонных сообществ водорослей и беспозвоночных; период III — сокращением видового богатства и количественных характеристик фито- и зоопланктона; период IV — ограниченным набором видов планктонных организмов с массовым развитием одно-двух видов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таксономическое разнообразие фито- и зоопланктона водохранилища Харанорской ГРЭС относительно невысокое (5–33 и 8–37 видов в разные годы соответственно), что является особенностью водоемов-охладителей (Novoselova, Protasov, 2015). Как и в других водоемах-охладителях (Кириллов и др., 2004; Протасов и др., 2011; Чеботина и др., 2013; Шакирова и др., 2014; Кулаков, 2020; Novoselova et al., 2020), состав альгофлоры и планктофауны водохранилища представлен преимущественно космополитными эвритермными видами пресноводного комплекса.

Развитие планктонных сообществ происходит во взаимосвязанной многофакторной системе гидрохимических и гидрофизических параметров (Протасов и др., 2011, Минеева и др., 2022). Температурный фактор — определяющий как в функционировании гидробиоценозов, так и вносящий существенный вклад в действие других факторов (Мордухай-Болтовской, 1975). Нарастание мощности электростанции, способствующее увеличению количества тепла, ежегодно поступающего в водоем, приводит к большему прогреванию воды, что вызывает изменения в составе, структуре и других характеристиках гидробиоценоза (Novoselova, Protasov, 2015; Protasov et al., 2017; Kulakov et al., 2018; Власов, Самойленко, 2021; Begun, Maslennikov, 2021 и др.). Начальный прогрев воды ($\leq 25^\circ\text{C}$) способствовал увеличению видового богатства гидробионтов (Cyanophyta, Chrysophyta, Chlorophyta, Rotifera, Copepoda). При наибольшей зафиксированной средней температуре ($>30^\circ\text{C}$), пессимальной для многих видов (Protasov et al., 2017), в водоеме наблюдали значительное сокращение числа таксонов планктонных организмов. Однако на фоне общей депрессии фитопланктона разнообразие и обилие

диатомовых водорослей, наиболее устойчивых к температурному стрессу (Rajadurai et al., 2005), увеличивалось (от 2 до 19 таксонов). На обширном материале показано, что существуют пороговые значения температуры (“заколдованные 30”) (Protasov, 2021), пагубно влияющие на рост, выживаемость и развитие гидробионтов.

Постоянно действующие факторы — колебание уровня и скорость водообмена — воздействуют на всю техноэкосистему (Степанова и др., 2016; Varinova et al., 2017; Джаяни, 2020). В водохранилище фактор маловодности (снижение уровня воды) оказывал опосредованное влияние на развитие фитопланктона. Уменьшение концентрации фосфора вследствие проводимой с 2017 г. осенней сработки уровня водохранилища (Афонина и др., 2020) способствовало значительному сокращению обилия цианобактерий и, соответственно, предотвращению “цветения” водоема.

Для развития планктоценозов также важны биотические факторы (биомелиорация, расселение инвайдеров и др.) (Novoselova, Protasov, 2015; Быков, 2016; Marenkov, 2018; Силаева и др., 2020). Интродукция растительных рыб дальневосточного комплекса, проводимая с 2000 г. (Андрюк и др., 2005; Афонин и др., 2014; Афонина и др., 2020), привела к депрессии фитопланктона и почти полному отсутствию макрофитов, а также к элиминированию видов фитофильного комплекса зоопланктона (*Euchlanis*, *Mytilina*, *Alonella*, *Pleuroxus*, *Macrocyclus*, *Megacyclus* и др.) соответственно.

Высокая амплитуда вариаций численности и биомассы гидробионтов в межгодовых и внутригодовых аспектах характерна для водоемов с высоким экологическим риском (Протасов и др., 2011) и свойственна для формирующихся водных экосистем (Лазарева, 2010), в которых $N_{\min}/N_{\max} > 10$ и $B_{\min}/B_{\max} > 10$ (Крючкова, 1985). Наибольшие количественные показатели фитопланктона регистрировали в августе 2001 г. ($10\,992.29 \pm 12\,337.07$ тыс. кл./л и 35.73 ± 46.71 г/м³), наименьшие — в октябре 2019 г. (43.5 ± 12.2 тыс. кл./л и 0.03 ± 0.01 г/м³). Вариации численности N_{\max}/N_{\min} и биомассы B_{\max}/B_{\min} достигали 219–649 и 123–893 соответственно. Максимум численности зоопланктона отмечен в мае 2003 г. (2011.26 ± 466.72 тыс. экз./м³), минимум — в октябре 2021 г. (10.52 ± 0.63 тыс. экз./м³); максимальная биомасса — в августе 1995 г. (7.30 ± 3.23 мг/м³), минимальная — в октябре 2021 г. (0.28 ± 0.04 мг/м³). Показатели B_{\max}/B_{\min} и N_{\max}/N_{\min} соответствовали 6–41 и 9–11. Межгодовые вариации численности и биомассы были более выражены у коловраток ($N_{\max}/N_{\min} = 50–120$, $B_{\max}/B_{\min} = 86–452$), намного меньше — у ракообразных (для Copepoda $N_{\max}/N_{\min} = 10–109$, $B_{\max}/B_{\min} = 5–13$; для Cladocera — 6–40 и 14–17 соответственно). Полученные значения

соотношений свидетельствуют о крайне неустойчивом характере экосистемы пруда-охладителя. Наибольшие флуктуации биомассы фито- и зоопланктона характерны для систем с доминированием эврибионтных видов, имеющих широкие экологические спектры и наиболее толерантных к периодическим и разным по мощности воздействиям факторов среды (тепловая нагрузка, температура воды, интенсивность водообмена, уровень воды). Для водохранилища Харанорской ГРЭС это виды *Aphanizomenon flos-aque*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria radians*, *Daphnia galeata*, *Bosmina longirostris*, *Cyclops vicinus* и *Thermocyclops crassus*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних исследований водоема-охладителя Харанорской ГРЭС показали, что сукцессии состава и структуры планктонных сообществ определяются комплексом техногенных и биотических факторов, степенью и продолжительностью их влияния. Повышенная температура как один из мощных экзогенных факторов, приводит к перестройке видового разнообразия гидробионтов. Периоды интенсивной вегетации водорослей и массового развития беспозвоночных чередуются со значительным спадом численности и биомассы гидробионтов, что свидетельствует о нестабильном состоянии формирующейся экосистемы пруда-охладителя. Процесс трансформации планктонных сообществ претерпел три этапа: периоды I–II — развитие разнообразных и обильных планктонных сообществ водорослей и беспозвоночных на фоне подогрева воды (<25°C); период III — сокращение видового богатства и количественных характеристик фито- и зоопланктона вследствие критически высокой температуры воды (>30°C); период IV — развитие ограниченного набора наиболее толерантных и устойчивых к температурному стрессу видов. Смена видов-доминантов фитопланктона шла в направлении: *Dictyococcus pseudovarians* + *Gyrosigma spenceri* var. *nodiferum* + *G. acuminatum* → *Aphanizomenon flos-aquae* → *A. flos-aquae* + виды рода *Oscillatoria* → *A. flos-aquae* + *Asterionella formosa*; зоопланктона: *Daphnia galeata* + *Asplanchna priodonta* + *Thermocyclops crassus* → *Kellicottia longispina* + *Bosmina longirostris* → *B. longirostris* → *B. longirostris* + *Thermocyclops crassus*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников лаборатории водных экосистем Института природных ресурсов экологии и криологии СО РАН и Байкальского филиала “Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства

и океанографии” (“ВНИРО” (“БайкалНИРО”)) за помощь в сборе проб, а также администрацию филиала “Харанорская ГРЭС” АО “Интер РАО — Электрогенерация” за помощь в организации экспедиционных выездов и предоставление материалов по гидрологическому и температурному режимам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было. Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований (№ государственной регистрации 121032200070-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андроникова И.Н. 1996. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука.
- Андрюк А.А., Афонин А.В., Афонина Е.Ю. и др. 2005. Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС и его жизнь. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Афонин А.В., Афонина Е.Ю., Ташлыкова Н.А. и др. 2014. Современное состояние экосистемы водоема-охладителя Харанорской ГРЭС и оценка эффективности вселения растительноядных рыб // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Сб. матер. V Всерос. конф. Ярославль: Филигрань. Т. 1. С. 115.
- Афонина Е.Ю., Куклин А.П., Ташлыкова Н.А. и др. 2020. Гидрохимическая и гидробиологическая характеристика водных объектов в районе Харанорской ГРЭС (по данным 2019 г.) // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Сб. матер. VII Всерос. конф. Ярославль: Филигрань. С. 8.
- Балушкина Е.Б., Винберг Г.Г. 1979. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука. С. 16.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. 2004. Возможные изменения водной биоты в период глобального потепления климата // Водн. ресурсы. Т. 31(4). С. 498.
- Безносков В.Н., Суздалева А.Л. 2005. Сукцессионное развитие экосистем техногенных водоемов // Антропогенные влияния на водные экосистемы. М.: Тов-во науч. изданий КМК. С. 120.
- Быков А.Д. 2016. Рыбохозяйственное значение и оценка влияния белого амура на экосистему водоемов-охладителей Центральной России // Рыбоводство и рыбное хозяйство. Т. 2. С. 25.
- Власов Б.П., Самойленко В.М. 2021. Влияние тепловой электростанции на экосистему водоема-охладите-

- ля Лукомское // География: развитие науки и образования: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. LXXV Герценовские чтения. СПб.: РГПУ. С. 31.
- Джаяни Е.А.* 2020. Межгодовые изменения фитопланктона Ириклинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 5. С. 450.
<https://dx.doi.org/10.31857/S0320965220050022>
- Кириллов В.В., Зарубина Е.Ю., Митрофанова Е.Ю. и др.* 2004. Биологическая оценка последствий термического загрязнения водоема-охладителя Беловской ГРЭС // Ползуновский вестник. № 2. С. 133.
- Киселев И.А.* 1969. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука. Т. 1.
- Кожова О.М.* 1970. Формирование фитопланктона Братского водохранилища // Формирование природных условий и жизни Братского водохранилища. М.: Наука. С. 7.
- Корнева Л.Г.* 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромск. печатн. дом.
- Крючкова Н.М.* 1985. Размерный состав, биомасса и продукция // Экологическая система Нарочанских озер. Минск: Изд-во "Университетское". С. 134.
- Кулаков Д.В.* 2020. Применение показателей зоопланктона для оценки воздействия атомных электростанций на водоемы-охладители // Водн. хозяй. России. № 5. С. 107.
<https://dx.doi.org/10.35567/1999-4508-2020-5-7>
- Лазарева В.И.* 2010. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М: Тов-во науч. изданий КМК.
- Лазарева В.И., Соколова Е.А.* 2013. Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современ. биол. Т. 133. № 6. С. 564.
- Минеева Н.М., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И.* 2022. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги // Биология внутр. вод. № 6. С. 640.
<https://dx.doi.org/10.31857/S0320965222060158>
- Мордухай-Болтовской Ф.Д.* 1975. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов // Экология организмов водохранилищ-охладителей: Тр. Ин-та биологии внутр. вод АН СССР. Вып. 27(30). С. 7.
- Мэгарран Э.* 1992. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир.
- Оглы З.П.* 1997. Фитопланктон Харанорского водохранилища // Флора, растительность и растительные ресурсы Забайкалья: Матер. междунар. конф. Чита: ЗабГГПУ. Т. 1. С. 106.
- Протасов А.А.* 2014. Концепция техноэкосистемы в технической гидробиологии // Гидробиол. журн. Т. 50. № 3. С. 3.
- Протасов А.А., Семенченко В.П., Силаева А.А. и др.* 2011. Техноэкосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки. Киев: Ин-т гидробиологии НАН Украины.
- Садчиков А.П.* 2003. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Изд-во Университет и школа.
- Силаева А.А., Протасов А.А., Новоселова Т.Н. и др.* 2020. О роли техноэкосистем ТЭС и АЭС в инвазивном процессе и сохранении разнообразия и богатства водной фауны и флоры // Моніторинг та охорона біорізноманіття в Україні. Вип. 16. Т. 2. С. 177.
- Степанова Т.И., Протасов А.А., Силаева А.А. и др.* 2016. Особенности гидробиологического режима техноэкосистемы Хмельницкой АЭС в условиях снижения уровня воды // Ядерна енергетика та докiлля. № 1. № 7. С. 37.
- Суздалева А.Л.* 2002. Структура и экологическое состояние природно-техногенных систем водоемов-охладителей АЭС: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ.
- Суздалева А.Л., Безносков В.Н.* 2000. Изменение гидрологической структуры водоемов и сукцессия водных биоценозов при их превращении в водоемы-охладители атомной (тепловой) электростанции // Инженер. экол. № 2. С. 47.
- Федоров В.Д., Гильманов Т.Г.* 1980. Экология. М.: МГУ.
- Цыбекмитова Г.Ц., Матвеева М.О.* 2020. Биогенные элементы (азот и фосфор) в Харанорском водохранилище // Экосистемы. № 24. С. 142.
<https://dx.doi.org/10.37279/2414-4738-2020-24-142-151>
- Чеботина М.Я., Гусева В.П., Поляков Е.В.* 2013. Исследование видовых характеристик и накопительной способности зоопланктона водоема-охладителя Белоярской АЭС // Уральск. геофиз. вестн. № 2(22). С. 59.
- Шакирова Ф.М., Валиева Г.Д., Гвоздарева М.А. и др.* 2014. Динамика качественных и количественных изменений гидробионтов и состояние экосистемы водохранилища под воздействием антропогенного фактора (на примере Кармановского водохранилища) // Изв. Самар. науч. центра РАН. Т. 16(1). С. 198.
- Barinova S.S., Protasov A.A., Novoselova T.N.* 2017. Spatial analysis of environmental and biological variables in the techno-ecosystem of the Khmelnitsky Nuclear Power Plant with new statistical approach // MOJ. Ecol. Environ. Sci. V. 2(3). Article 00024.
<https://dx.doi.org/10.15406/moj.2017.02.00024>
- Begun A.A., Maslennikov S.I.* 2021. Influence of the technical ecosystem of the Electric Power Plant (Vladivostok) on the phytoplankton of the Japanese Sea // Water Res. V. 48. P. 404.
<https://dx.doi.org/10.1134/S0097807821030052>
- De Senerpont Domis L.N., Elser J.J., Gsell A.S. et al.* 2013. Plankton dynamics under different climatic conditions in space and time // Freshwater Biol. V. 58. P. 463.
<https://dx.doi.org/10.1111/fwb.12053>
- Jeppesen E., Brucet S., Naselli-Flores L. et al.* 2015. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and salinity // Hydrobiologia. V. 750. P. 201.
<https://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>

- Kulakov D.V., Vereshchagina Ye.A., Makushenko M.Ye.* 2018. Influence of heated waters discharge on zooplankton of various cooling ponds of Nuclear Power Stations // *Hydrobiol. J. V. 54(3)*. P. 60. <https://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v54.i3.60>
- Lazareva V.I., Mineeva N.M., Zhdanova S.M.* 2014. Spatial distribution of plankton from the Upper and Middle Volga reservoirs in years with different thermal conditions // *Biol. Bull. V. 41*. P. 869. <https://dx.doi.org/10.1134/S1062359014100070>
- Marenkov O.M.* 2018. Ichthyofauna of the Zaporizhka Nuclear Power Plant cooling pond (Enerhodar, Ukraine) and its biomeliorative significance // *Ukrain. J. Ecol. V. 8(2)*. P. 140. https://dx.doi.org/10.15421/2018_321
- Novoselova T.N., Protasov A.A.* 2015. Phytoplankton of cooling ponds of techno-ecosystems of nuclear and thermal power stations (a review) // *Hydrobiol. J. V. 51(3)*. P. 37. <https://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v51.i2.40>
- Novoselova T.N., Sylvaeva A.A., Gromova Yu.F. et al.* 2020. Technoecosystem of the cooling pond of the South Ukrainian Nuclear Power Plant: group dynamics and transformation // *Ecosyst. Transform. V. 3(1)*. P. 40. <https://dx.doi.org/10.23859/estr-191112>
- Protasov A.A.* 2021. Paradigm shift in technical hydrobiology: from local impact, to a new techno-ecosystem concept for thermal and nuclear plant water // *Ecosyst. Transform. V. 4(1)*. P. 3. <https://doi.org/10.23859/estr-201022>
- Protasov A.A., Sylvaeva A.A., Novoselova T.N. et al.* 2017. Nuclear Power Plant technoecosystem: 18 years of hydrobiological observations // *J. Sib. Fed. Univ. Biol. V. 10(4)*. P. 459. <https://dx.doi.org/10.17516/1997-1389-0045>
- Rajadurai M., Poornima E.H., Narasimhan S.V. et al.* 2005. Phytoplankton growth under temperature stress: Laboratory studies using two diatoms from a tropical coastal power station site // *J. Thermal Biol. V. 30*. P. 299. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2005.01.003>
- Ruttner-Kolisko A.* 1977. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers // *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. Stuttgart. Bd 8. S. 71*.

Transformation of Planktonic Assemblages in a Severely Stressed Cooling Reservoir

E. Yu. Afonina^{1,*}, N. A. Tashlykova¹

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*
*e-mail: kataf@mail.ru

The results of long-term studies in the cooling reservoir of the Kharanorskaya SDPP (Transbaikalia) are presented, conventionally divided into four periods depending on the increase in power plant capacity. The stages of phyto- and zooplankton development determined by the influence of technogenic and biotic factors are determined. The response of plankton communities to changes in heat load is shown. Periods of intensive vegetation of algae and mass development of invertebrates alternate with a significant decline in the number and biomass of hydrobionts, which indicates an unstable state of the forming cooling pond technoecosystem.

Keywords: technoecosystem, cooling pond, environmental factors, transformation, phytoplankton, zooplankton