

СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

УДК [574.583(28):59]:574.532

ОБИЛИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СМЕРТНОСТЬ ГИДРОБИОНТОВ НА РЕЧНОМ УЧАСТКЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОДОГРЕТЫХ ВОД ГРЭС

© 2023 г. Ю. В. Герасимов^{а, *}, С. Э. Болотов^а, А. И. Цветков^а, Э. С. Борисенко^б

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

^бИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: gu@ibiw.ru

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 31.01.2023 г.

Принята к публикации 10.02.2023 г.

Проведен сравнительный анализ таксономического состава, обилия и сезонной динамики плотности зоопланктона и рыб на речном участке Горьковского водохранилища и в р. Шача в зоне влияния сбросных подогретых вод Костромской ГРЭС в вегетационный период (май–ноябрь) 2021 г. В местах максимального прогрева воды наблюдали пониженное видовое богатство, которое, однако, быстро возвращалось к исходным значениям на нижерасположенном участке реки. Летальное действие теплых вод на зоопланктон проявлялось преимущественно в летний период, когда на естественный прогрев реки накладывалось влияние подогретых вод ГРЭС. Осенью отепляющий эффект подогретых вод, наоборот, способствовал лучшей выживаемости организмов. Высокой численности рыбы на исследуемом участке достигали к концу лета, когда подросшая молодь выходила с мелководий. В осенний период отмечено перераспределение рыб и достоверное увеличение численности на участках акватории с подогретой водой по сравнению с фоновыми. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии экологически значимого летального эффекта. Локальные потери планктона быстро компенсируются за счет высоких темпов размножения и короткоцикличности развития беспозвоночных. Летальный эффект воздействия повышенных температур на рыб не отмечен.

Ключевые слова: ГРЭС, тепловое загрязнение, состав зоопланктона, смертность, рыбное население, сезонная динамика плотности, распределение

DOI: 10.31857/S0320965223060116, EDN: KFLKDG

ВВЕДЕНИЕ

Роль температуры как фактора, регулирующего все стороны биологии и экологии пойкилотермных гидробионтов, известна (Kishi et al., 2005; Havens et al., 2014). Это касается и беспозвоночных (Тарра, 1965; Geraldес, Voavida, 2004; Лунева, 2014; Вербицкий и др., 2017; Герасимова и др., 2021), и рыб (Голованов, 2013; Goflacheva, 2015; Девятков и др., 2017; Мочек, Павлов, 2021). Изучение влияния на зоопланктонные сообщества пресных водоемов комплекса абиотических и биотических факторов привело ряд исследователей к убеждению, что именно температура служит основным структурирующим фактором для этих сообществ, а распределение и сезонная последовательность смены видов Cladocera может быть во многих случаях объяснена различием или изменением температуры воды (Тарра, 1965; Geraldес, Voavida, 2004).

Наиболее сильное воздействие на структуру экосистемы оказывает температура в водоемах-

охладителях (Животова, 2007а, 2007б; Протасов, Силаева, 2012; Лунева, 2014; Девятков и др., 2017). Но водоемы-охладители – технологические водоемы, для которых повышенный температурный фон считается “естественным” и относительно постоянным. По утверждению Животовой (2007а, 2007б), состав и структура зоопланктоценозов водоема-охладителя зависят от режима эксплуатации АЭС и температурного режима и не связаны с их географическим положением и морфометрическими характеристиками. В предложенной автором классификации водоемов-охладителей (Животова, 2007а) они ранжируются исключительно по уровню тепловой нагрузки, зависящей от режима эксплуатации энергетического предприятия.

Термин “тепловое загрязнение”, очевидно, логичнее использовать для естественных водоемов, на участки которых происходит локальный сброс более или менее охлажденных вод из водоемов-охладителей. Таким участкам свойственны

значительные колебания тепловой нагрузки. На них, кроме режима эксплуатации предприятия, в значительной степени влияют и изменения факторов среды: сезонные изменения температуры среды, водности (уровня и проточности), наличие течений, их скорость и направление и т.д.

Один из таких участков – акватория Горьковского водохранилища, куда сбрасываются теплые воды из водоемов-охладителей Костромской ГРЭС. Сброс подогретой воды с двух энергоблоков первой и второй очередей строительства ГРЭС по 300 МВт каждый осуществляется в залив устьевой части р. Шача, образованный за счет подпора реки водой Горьковского водохранилища. Поступление теплой воды в Горьковское водохранилище происходит через естественное устье р. Шача. Сброс воды с энергоблока третьей очереди мощностью 1200 МВт осуществляется через открытый сбросной канал в водоем-охладитель, образованный на переформированном русле р. Кешка и затем по каналу сбрасывается на речной участок Горьковского водохранилища выше по течению от устья р. Шача.

Цель работы – дать сравнительный анализ таксономического состава, обилия и сезонной динамики плотности зоопланктона и рыб на речном участке Горьковского водохранилища и в р. Шача в зоне влияния сбросных подогретых вод Костромской ГРЭС.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на речном участке Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС (рис. 1) ежемесячно в вегетационный период (май–ноябрь) 2021 г.

Во время проведения исследований энергоблок третьей очереди мощностью 1200 МВт периодически отключался, соответственно, поступление подогретой воды в Горьковское водохранилище из водоема-охладителя в р. Кешка происходило эпизодически. Поэтому данные по сезонной динамике были получены только на участке сброса подогретой воды из водоема-охладителя в устьевой части р. Шача на речной участок Горьковского водохранилища и от устья р. Шача вверх по ее руслу на расстояние 3 км до верхней границы влияния теплых вод Костромской ГРЭС (рис. 1).

Температура. Для измерения характеристик полей поверхностных температур использовали кондуктометр “Марк-603” (ООО “Взор”, <https://vzorpp.ru>, точность измерения $\pm 0.3^\circ\text{C}$), подключенный к микрокомпьютеру на базе RK3399(2018) (<https://wiki.radxa.com/Rock4>) с приемником GPS. Интервал измерения одна минута.

Для получения общей картины распределения температуры поверхностных слоев воды в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС ис-

пользовали данные со спутников Landsat-8 с разрешением 100 м в пикселе (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>) (рис. 2). Эти данные хорошо согласовались с данными наших измерений температуры воды, проводимых в аналогичный период с точностью до $\pm 1^\circ\text{C}$.

Измерения на глубинных профилях стандартных станций проводили при помощи многопараметрического ручного зонда YSI EXO2 (<https://www.ysi.com/exo2>, USA, точность измерения $\pm 0.01^\circ\text{C}$) в режиме автоматического зондирования с временным интервалом 1 с, путем постепенного равномерного опускания зонда на тросе.

Зоопланктон. Пробы зоопланктона отбирали ежемесячно на семи станциях: ст. 1 и 4 – фоновые станции водохранилища, выше сброса подогретых вод; ст. 2 и 5 – непосредственно в потоке теплой воды на устьевых участках сбросных каналов; ст. 3 и 6 – в акватории водохранилища ниже по течению от мест поступления теплой воды (рис. 1). Также исследования проводили на ст. 7 – верховья зоны стабильного подпора устьевой области р. Шача, где преобладает естественный термический режим, но периодически могут поступать теплые воды. Несмотря на это, авторы рассматривают ст. 7 как фоновую, поскольку, как показано далее, планктон ее вод отвечает особенностям сообществ, свойственным устьевым областям рек с природным экологическим режимом: высокое видовое богатство, специфический таксономический состав, повышенные обилие и продуктивность, низкие, относительно импактных участков, показатели смертности (Гидроэкология..., 2015).

Зоопланктон собирали планктоботометром Дьяченко–Кожевникова (объем 5 л) в столбе воды от поверхности до дна с последующим процеживанием через сито с размером ячеек 64 мкм. Для характеристики летального действия повышенной температуры воды на зоопланктон оценивали смертность планктонных животных методом прижизненного окрашивания (Семенова, 2010). Для этого свежееотобранную пробу зоопланктона количественно переносили и в течение 15 мин выдерживали в стейнере с 7.5%-ным раствором анилинового голубого красителя. Затем окрашенную таким способом пробу отмывали от красителя профильтрованной через ситоткань водой и фиксировали 4%-ным формалином. Камеральную обработку проб зоопланктона проводили по стандартной методике (Методика..., 1975).

Зоопланктон оценивали по видовому богатству, удельному разнообразию (Sp) – среднему числу видов в одной пробе, численности (N), биомассе (B) и суточной продукции ($P_{\text{сод}}$). При характеристике видовой структуры сообществ к доминантам относили виды с относительным обилием (по численности и биомассе) $\geq 5\%$. Оценку экологического состояния речных вод давали на

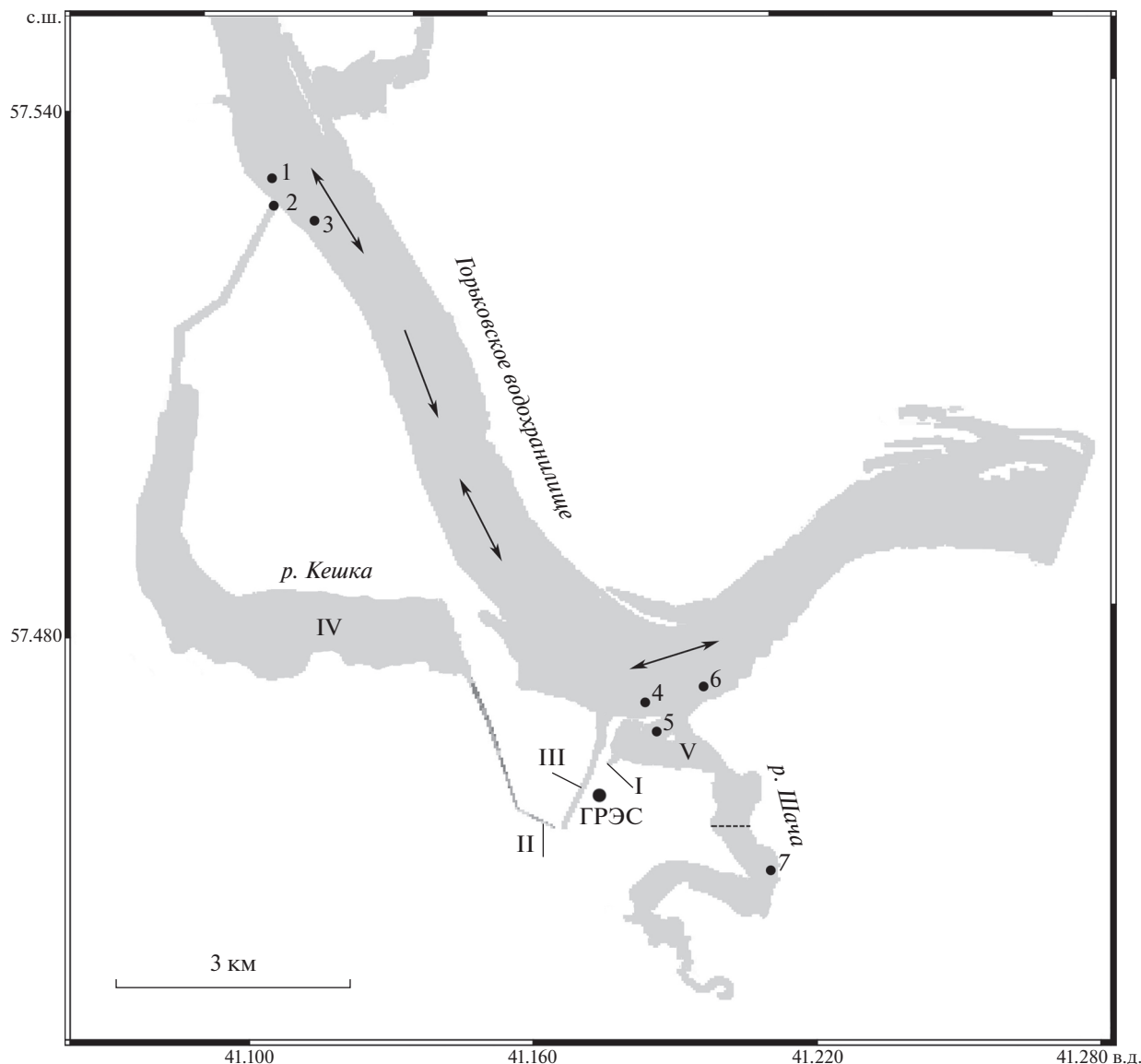


Рис. 1. Район исследований. I – сбросной канал 1, II – сбросной канал 2, III – водозаборный канал, IV – водоем-охладитель (русло р. Кешка), V – водоем-охладитель (устье р. Шача); 1–7 – номера станций отбора планктонных проб. Стрелкой обозначено направление течения, двойными стрелками – места траления, пунктиром – место постановки сетей.

основе индекса сапробности S , рассчитанному по методу Пантле–Букк в модификации Сладечека (Sladecsek, 1973). Экологические параметры зоопланктона рассчитывали с использованием модуля экологического анализа сообществ пресноводного зоопланктона “FW-Zooplankton”, разработанного в Институте биологии внутренних вод РАН и зарегистрированного в системе РОСПАТЕНТа. Всего собрано, обработано и проанализировано 46 проб зоопланктона.

Рыбы. Плотность и распределение рыб исследовали при помощи малогабаритного многолучевого научно-исследовательского комплекса “PanCor” (ООО “Промгидроакустика”, Россия), установлен-

ного на моторной лодке. Эхосъемку проводили в светлое время суток в режиме вертикального зондирования водной среды равномерными пилообразными галсами от берега к берегу на постоянной скорости моторной лодки (~5 км/ч). Съёмку начинали выше места сброса подогретой воды и заканчивали ниже.

Обследовали три участка: в районе сброса воды третьего энергоблока, в районе устья р. Шача и участок р. Шача от устья и вверх по течению на расстояние 2.3 км до границы влияния теплых вод Костромской ГРЭС. Наблюдения проводили в безледный период с мая по ноябрь один раз в месяц.

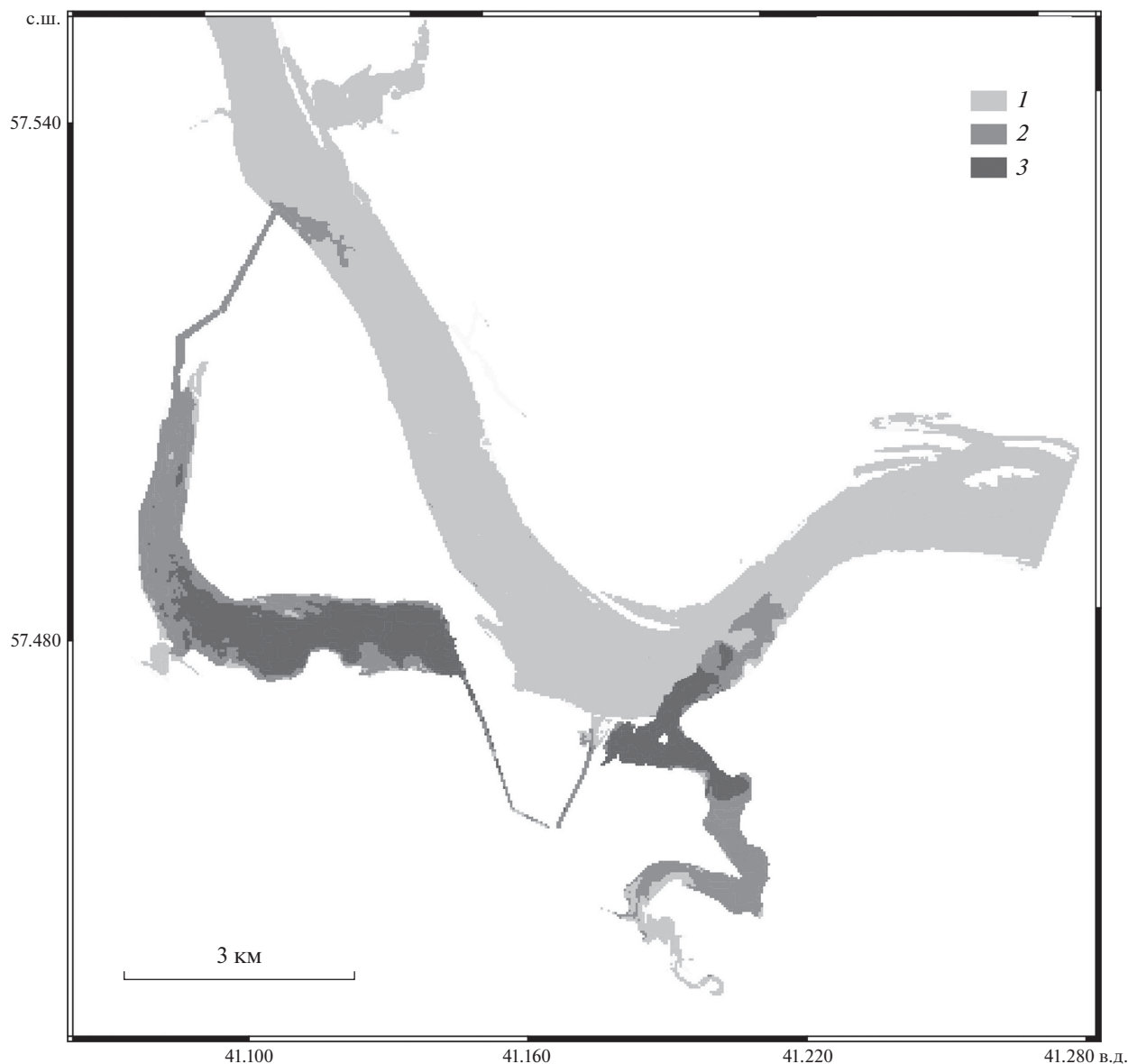


Рис. 2. Температура воды ($^{\circ}\text{C}$) на участке Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС в период максимального прогрева в июле (31.07.2021 г.). Данные со спутников Landsat-8 с разрешением 100 м в пикселе (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>): 1 – (19–21 $^{\circ}\text{C}$); 2 – (21–24 $^{\circ}\text{C}$); 3 – (24–29 $^{\circ}\text{C}$).

В результате эхометрических съемок акваторий строили карты-планшеты пространственного распределения рыбы на обследованных участках, определяли плотности скоплений рыб за каждые 100 посылок гидроакустических сигналов и осуществляли аппроксимацию плотностей распределения рыб в акватории методом “кригинга” (Surfer8, 2000) с линейной моделью вариограммы. Определяли распределение плотности рыб, среднюю плотность скоплений и общую численность рыбного населения на исследуемых участках. По значениям силы цели рыб строили гистограммы размерного состава рыб.

Видовой состав рыб определяли по траловым уловам при тралении разноглубинным тралом с научно-исследовательского судна Института биологии внутренних вод РАН “Академик Топчиев”. Траления проводили на трех траловых станциях в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС (рис. 1) в направлении против течения. Рыбу отлавливали с помощью пелагического трала со следующими параметрами: горизонтальное раскрытием – 17 м, вертикальное раскрытие – 1.8 м, ячея в кутке – 4 мм. Длина ваеров 75 м, продолжительность траления 10 минут, скорость судна ~4.5 км/ч.

На каждой станции проводили два траления: одно — в поверхностном слое, второе — на горизонтах от 2 до 6 м в зависимости от вертикального распределения рыб, которое оценивали по данным гидроакустики. На мелководье акватории Горьковского водохранилища в р. Шача рыб отлавливали порядком из разноячейных жаберных сетей с диапазоном размера ячеек от 16 до 50 мм.

Статистика. Для характеристики статистической неопределенности выборочных средних методом непараметрического бутстрепа (алгоритм *BCa*, 9999 пермутаций) рассчитывали их 95%-ные доверительные интервалы. Статистические различия экологических параметров сообществ оценивали на основе непараметрического аналога дисперсионного анализа — *H*-критерия Краскела—Уоллиса, апостериорные сравнения групповых средних выполняли с применением *U*-критерия Манна—Уитни. Статистическую оценку различий в распределении плотностей рыб на отдельных участках акватории определяли с использованием непараметрического критерия Колмогорова—Смирнова (*K-S statistic*). Статистически значимыми принимали различия при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Температура. На речном участке Горьковского водохранилища доминирует стоковое течение со скоростью 0.05–0.08 м/с. Участки сброса подогретой воды находятся друг от друга на расстоянии 8.5 км (рис. 1, рис. 2). Спутниковые данные по распределению температуры поверхностных слоев воды в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС, полученные в период максимального прогрева водной массы в июле показали, что отопляющий эффект от сбросных вод не распространяется на стрижневую часть русла и пойму левого берега (рис. 2). Это соответствовало данным наших измерений на участке, примыкающем к устью р. Шача (рис. 3). Теплые воды распространялись вниз по течению по правобережной пойме.

Подогретая вода в системе р. Шача — устьевой участок р. Шача, преобразованный в водоем охладитель, — участок Горьковского водохранилища, куда поступает частично охлажденная вода из устьевого участка р. Шача, распределялась от устьевой части р. Шача вверх (по участку подпора реки водой Горьковского водохранилища) на расстояние до 3 км и вниз по течению речного участка Горьковского водохранилища (по правой пойме) на расстояние до 2 км (рис. 2, рис. 3).

Подогретая вода в системе р. Кешка — участок русла р. Кешка, преобразованный в водоем-охладитель (сбросной канал), поступает на участок акватории Горьковского водохранилища, более

охлажденной, чем из р. Шача, и распространяется вниз по течению на расстояние <1 км (рис. 2).

Во все сезоны разница между температурой сбросной воды и фоновой температурой была >10°C. Температура воды, поступающей на участок Горьковского водохранилища через естественное устье р. Шача, превышала фоновую температуру на 6–8°C. Температура воды в р. Шача на расстоянии 3 км от устья отличалась от фоновой на 2–2.5°C, что подтверждают данные спутника (рис. 2) и наши измерения (рис. 3).

Зоопланктон. В период исследований в 2021 г. зоопланктон Горьковского водохранилища в зоне влияния Костромской ГРЭС представляли 114 таксонов. Основу видового богатства формировали коловратки (69 видов), меньшим разнообразием характеризовались планктонные ракообразные — 45 видов, из них ветвистоусых раков — 33 вида, веслоногих — 12.

Видовой состав планктона типичен для водоемов бассейна Средней Волги, отличается высокой представленностью широко распространенных всесветных и бореально-арктических элементов. В экологическом отношении разнообразие беспозвоночных характеризуется значительной долей зарослевых форм (коловратки родов *Cephalodella*, *Colotheca*, *Dicranophorus*, *Euchlanis*, *Lecane*, *Mytilina*, *Trichocerca*, ракообразные сем. *Daphniidae*, подсем. *Chydorinae*, *Sida crystallina*) и мейобентосных (коловратки отряда *Bdelloida*, *Notommata cyrtopus*, *Proales decipiens*, ветвистоусые раки подсем. *Aloninae*, *Ilyocryptus sordidus*, *Leydigia leydigi* и др., копепода *Paracyclops fimbriatus*).

В составе сообществ отмечено 30 видов—индикаторов мезоэвтрофных вод — коловратки *Anuraeopsis fissa*, *Brachionus angularis*, *B. calyciflorus*, *B. diversicornis*, *B. quadridentatus*, *B. urceus*, *Filinia longiseta*, *Keratella cochlearis*, *K. quadrata*, *K. testudo*, *Polyarthra euryptera*, *P. major*, *Pompholyx sulcata*, *Trichocerca (D.) similis*, *T. (D.) tenuior*, *T. capucina*, *T. cylindrica*, *T. elongata*, *T. longiseta*, *T. mucosa*, *T. pusilla*, *T. rattus*, *T. stylata*, *T. pocillum*, *Trichotria truncata*, ракообразные *Bosmina longirostris*, *Ceriodaphnia pulchella*, *Chydorus sphaericus*, *Daphnia cucullata*, *Thermocyclops crassus*.

Среди планктонных животных регулярной встречаемостью ($P = 80–100\%$) отличались *Keratella quadrata* (93.5%), *Bosmina longirostris* (82.6), *Brachionus angularis* (80.4) и *Keratella cochlearis* (80.4). Сравнительно часто ($P = 50–80\%$) отмечали *Chydorus sphaericus* (78.3%), *Mesocyclops leuckarti* (78.3), *Asplanchna priodonta* (76.1), *Daphnia galeata* (76.1), *Euchlanis dilatata* (73.9), *Bosmina longispina* (73.9), *Synchaeta pectinata* (71.7), *S. tremula* (67.4), *Kellcottia longispina* (56.5), *Polyarthra major* (56.5), *Daphnia cucullata* (50.0), *Thermocyclops crassus* (50.0). Частота встречаемости подавляющего большинства (98 из 114) видов не превышала 50%, что свидетельствует

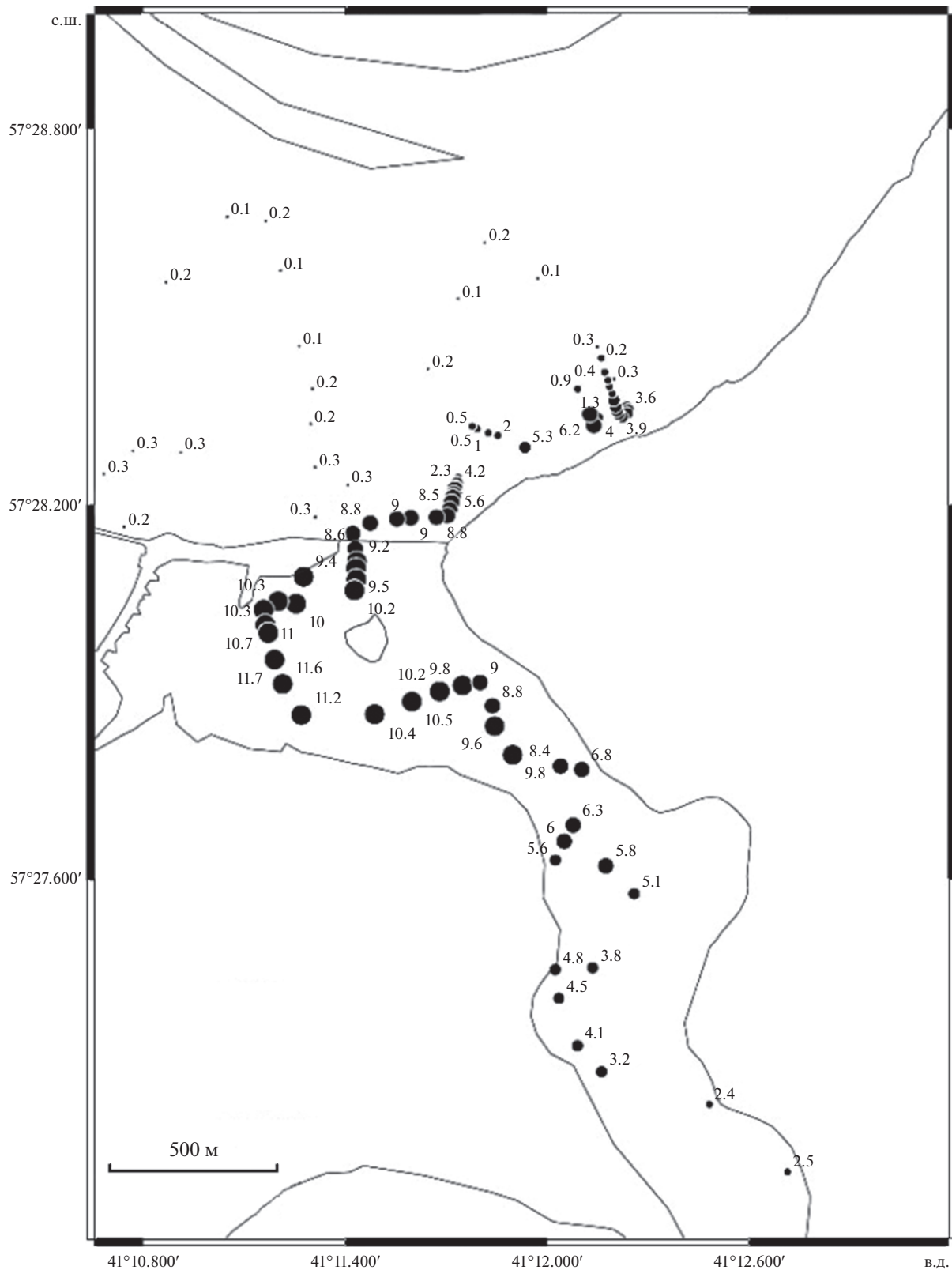


Рис. 3. Распределение температуры в р. Шача и прилегающем участке Горьковского водохранилища в ноябре. Размер кружков пропорционален температуре воды. Рядом с кружками показаны значения температуры ($^{\circ}\text{C}$) в данной точке.

о сильной пространственно-временной изменчивости видовых комплексов планктонных сообществ. Особенно специфичен видовой состав планктона в зоне выпуска подогретых вод. Так, сообщества в зоне сброса теплых вод (ст. 2 и 5) отличаются своеобразным составом и за счет теплолюбивых видов обособляются отдельными фаунистическими кластерами (рис. 4). Аналогичная картина характерна для ст. 7, но ее фаунистическая специфика, по-видимому, связана с природными причинами – естественным прогревом широкой и мелководной устьевой области р. Шача в зоне стабильного подпора. При этом состав планктона в зоне техногенного (ст. 2 и 5) и преимущественно естественного прогрева (ст. 7) схожи только на 49.4–56.2% соответственно.

Наряду с этим, сообщества участков водохранилища, расположенных выше и ниже выпуска подогретых вод, демонстрируют сильное сходство видовых комплексов и выделяются обособленными от прочих кластерами описаний. Это может свидетельствовать об отсутствии значимой трансформации видового состава зоопланктона участков водохранилища, расположенных ниже сброса теплых вод. Аналогичные выводы следуют из анализа видового богатства сообществ (табл. 1). Относительно фоновых участков реки видовое богатство зоопланктона в зоне сброса теплых вод либо возрастает (ст. 2), либо незначительно снижается (ст. 5), но в целом увеличивается на участках ниже водовыпуска.

По показателям количественного развития планктон Горьковского водохранилища в зоне

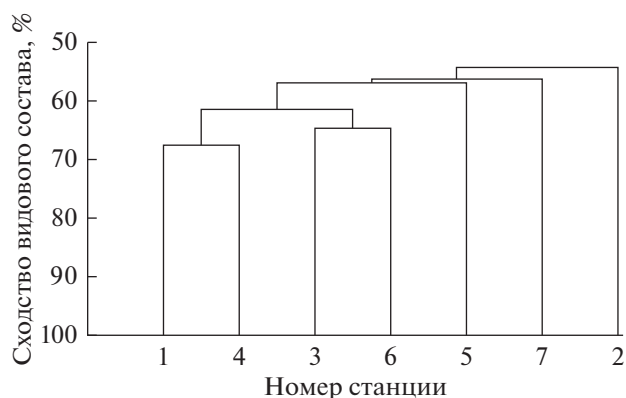


Рис. 4. Дендрограмма сходства видового состава зоопланктона в точках его отбора в районе Костромской ГРЭС. Нумерация станций в соответствии с рис. 1.

влияния подогретых вод Костромской ГРЭС демонстрирует своеобразные и разнонаправленные паттерны распределения (табл. 1). В одном случае наблюдается стимулирующее воздействие на планктон в зоне сброса теплых вод (ст. 1–3), в другом – его угнетение относительно фоновых показателей (ст. 4–6). Указанные различия, по-видимому, определяются техногенным режимом сброса подогретых вод ГРЭС (периодический или регулярный, хронический) и интенсивностью их прогрева.

Удельное видовое богатство зоопланктона сравнительно невелико и в среднем было 24.8 ± 1.9 вида на пробу. Количество видов, обнаруженных в одной пробе, увеличивалось с мая (19.4 ± 2.4 вида на

Таблица 1. Показатели сообществ зоопланктона на участке Горьковского водохранилища в районе Костромской ГРЭС в 2021 г.

Показатель	Станция						
	1	2	3	4	5	6	7
N_{sp}	60	69	69	67	61	68	64
S_p	$\frac{24.8}{20.2-29.5}$	$\frac{26.7}{21.7-31.2}$	$\frac{26.0}{21.0-30.5}$	$\frac{26.7}{20.0-33.1}$	$\frac{22.1}{19.1-24.9}$	$\frac{23.1}{17.6-28.4}$	$\frac{24.9}{21.4-28.1}$
$N_{общ}$	$\frac{51.7}{23.3-81.3}$	$\frac{71.3}{43.2-100}$	$\frac{64.6}{39.7-87.5}$	$\frac{88.1}{28.3-172}$	$\frac{20.7}{16-26.3}$	$\frac{36.2}{17.6-56.2}$	$\frac{139}{54.5-230}$
$B_{общ}$	$\frac{288.5}{144.8-439.9}$	$\frac{549.8}{211.0-945.3}$	$\frac{426.8}{230.9-614.9}$	$\frac{387.3}{180.9-616.6}$	$\frac{133.6}{93.1-172.3}$	$\frac{208.7}{83.5-354.2}$	$\frac{1369.2}{397.8-2396.5}$
$P_{сооб}$	$\frac{23.9}{13.2-34.8}$	$\frac{43.0}{17.1-70.9}$	$\frac{32.2}{19.0-46.6}$	$\frac{32.1}{14.2-53.8}$	$\frac{10.7}{7.4-13.8}$	$\frac{15.2}{6.2-25.9}$	$\frac{81.1}{6.0-163.4}$
S	$\frac{1.52}{1.44-1.59}$	$\frac{1.58}{1.53-1.63}$	$\frac{1.51}{1.48-1.53}$	$\frac{1.52}{1.47-1.56}$	$\frac{1.55}{1.47-1.63}$	$\frac{1.49}{1.45-1.54}$	$\frac{1.51}{1.47-1.55}$

Примечание. Здесь и в табл. 3 N_{sp} – видовое богатство; S_p – уровень удельного разнообразия (видов); $N_{общ}$ – численность, (тыс. экз./м³); $B_{общ}$ – биомасса беспозвоночных, (мг/м³); $P_{сооб}$ – суточная продукция сообществ, кал/(м³ · сут), S – сапробности воды (ед). Над чертой – среднее, под чертой – нижняя и верхняя границы 95%-ного доверительного интервала. Здесь и далее нумерация станций в соответствии с рис. 1.

Таблица 2. Статистическая оценка значимости изменения показателей количественного развития зоопланктона в зоне влияния подогретых вод на основе *H*-критерия Краскела—Уоллиса

Показатель	ст. 1–3				ст. 4–7			
	<i>Sp</i>	<i>N</i> _{общ}	<i>B</i> _{общ}	<i>P</i> _{сооб}	<i>Sp</i>	<i>N</i> _{общ}	<i>B</i> _{общ}	<i>P</i> _{сооб}
Весенне-летний период								
<i>H</i>	1.510	0.269	0.500	0.154	3.358	9.154	9.949	4.919
<i>p</i>	0.466	0.874	0.779	0.926	0.338	0.027	0.019	0.178
Весь вегетационный период								
<i>H</i>	0.667	0.784	1.064	0.737	1.382	5.964	7.725	4.448
<i>p</i>	0.715	0.676	0.587	0.692	0.708	0.113	0.052	0.217

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые эффекты влияния подогретых вод при $p \leq 0.05$.

пробу), достигало максимума в июле—августе (30.7 ± 2.4 и 31.6 ± 3.1 соответственно) и снижалось в ноябре (17.0 ± 1.5). Удельное разнообразие планктона в зоне сброса теплых вод на ст. 2 в среднем было выше по сравнению с выше- и нижерасположенными участками реки (26.7 против 24.8 и 26.0 вида на пробу соответственно). Напротив, планктон ст. 5 в зоне сброса подогретых вод характеризовался пониженным удельным разнообразием относительно выше- и нижерасположенных участков реки (22.1 вида на пробу против 26.7 и 23.1 соответственно).

Зоопланктон водохранилища в районе Костромской ГРЭС отличался умеренным обилием со средними значениями численности 67.7 ± 22.3 тыс. экз./м³, биомассы — 484.4 ± 213.4 мг/м³. Сезонная кривая обилия имела бимодальный вид с основным максимумом в июне (пик биомассы — 979.7 ± 622.3 мг/м³) или июле (пик численности — 137.2 ± 84.5 тыс. экз./м³) и меньшим пиком в сентябре (59.3 ± 20.8 тыс. экз./м³ и 361.2 ± 164.8 мг/м³). Планктон в зоне влияния подогретых вод на ст. 2 был более обильным (в среднем 71.3 тыс. экз./м³ и 549.8 мг/м³), чем на выше- (51.7 тыс. экз./м³ и 288.5 мг/м³) и нижележащих (64.6 тыс. экз./м³ и 426.8 мг/м³) участках реки. Напротив, обилие беспозвоночных в зоне выпуска теплых вод в р. Шача (ст. 5) было ниже, чем на ст. 4 и 7 с преобладанием естественного термического режима (в 4–6 раз по численности и 3–10 раз по биомассе) и расположенной ниже по течению ст. 6 (в 1.7 раза по численности и 1.6 раза по биомассе). Это указывает на угнетающее для зоопланктона воздействие подогретых вод, сбрасываемых в р. Шача.

Аналогичные черты свойственны для величины продуктивности сообществ. Так, суточная продукция зоопланктона в зоне водовыпуска (ст. 2) в 1.3–1.8 раза превышала таковую на выше- и нижерасположенных участках реки (43.0 против 23.9 и 32.2 кал/(м³ · сут) соответственно). Напротив, перегрев водных масс в зоне сброса теплых вод в р. Шача приводил к снижению продуктивно-

сти сообщества на ст. 5 (до 10.7 кал/(м³ · сут)) относительно фоновых в 3–7.6 раза (32.1 кал/(м³ · сут) на ст. 4 и 81.1 — на ст. 7) и нижележащих — в 1.4 раза (15.2 кал/(м³ · сут) на ст. 6) речных участков. В целом, зоопланктон Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС можно охарактеризовать как умеренно-продуктивный со средними значениями суточной продукции 34.1 ± 15.8 кал/(м³ · сут).

Расчетные оценки индекса сапробности Пантле—Букк, вычисленного по показателям развития зоопланктона, соответствуют верхней границе олигосапробных — нижней границе β-мезосапробных вод. Это соответствует категории чистых — умеренно загрязненных вод. Максимальные значения сапробности регистрировали в зоне сброса подогретых вод (в среднем 1.58 на ст. 2 и 1.55 — на ст. 5), меньшие (1.51–1.52) — на фоновых участках рек, минимальные (1.49–1.51) — на участках ниже сброса теплых вод. Это указывает на локализацию повышенного содержания лабильной органики в зоне выпуска подогретых вод.

Статистическое тестирование эффектов влияния особенностей термического режима на показатели развития зоопланктона выявило достоверные изменения количественных характеристик сообществ подогретых вод в весенне-летний период только для группы станций 4–7, и лишь для показателей численности и биомассы организмов (табл. 2). Это свидетельствует об отсутствии экологически значимых эффектов сброса теплых вод для группы станций 1–3, снижении численности и биомассы (но не разнообразия и продуктивности) планктона для группы станций 4–7.

С целью интегральной оценки негативного воздействия на зоопланктон сбрасываемых подогретых вод проведены дополнительные исследования его смертности методом прижизненного окрашивания анилиновым голубым (табл. 3, рис. 4).

Относительно речных участков с преобладанием природного термического режима (ст. 1, 7) доля мертвого зоопланктона в условиях воздей-

Таблица 3. Сезонная динамика смертности зоопланктона Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС

Месяц	Смертность планктона (%)					
	1	3	4	5	6	7
Май	2.8	6.4	2.0	9.5	4.3	0.4
Июнь	1.3	2.8	0.7	13.3	5.3	1.6
Июль	2.2	6.1	14.7	19.1	6.8	0.8
Август	1.4	0.9	1.7	8.7	1.5	0.9
Сентябрь	1.4	1.5	1.3	4.5	1.3	0.9
Октябрь	0.5	0.1	0.9	1.3	1.1	0.2
Ноябрь	—	—	4.2	1.4	4.6	1.6
Среднее за вегетационный период	<u>1.60</u> 1.03–2.13	<u>2.97</u> 1.05–4.88	<u>1.80</u> 0.98–2.75	<u>8.26</u> 3.97–12.71	<u>3.56</u> 2.09–5.10	<u>0.91</u> 0.53–1.27

Примечание. 1–7 — станции. Над чертой — среднее, под чертой — нижняя и верхняя границы 95%-ного доверительного интервала, “—” — отсутствие данных.

ствия подогретых вод существенно возрастает: в среднем в 1.8 раз для ст. 3, в 2.3 раза — для ст. 4, в 5.7 раз — для ст. 5, в 2.2 раза — для ст. 6. В наибольшей степени летальное действие теплых вод на зоопланктон проявляется в летний период, когда на естественный прогрев реки накладывается влияние подогретых вод ГРЭС. При этом доля мертвого зоопланктона в отдельных случаях может достигать 8.7–19.1%.

Осенью отепляющий эффект подогретых вод, наоборот, способствует лучшей выживаемости организмов планктона, чем в холодных речных водах.

При оценке фонового уровня смертности зоопланктона следует ориентироваться на максимальные значения таковой на ст. 1, не подверженной воздействию подогретых вод ГРЭС. Смертность животных здесь была в среднем $1.6 \pm 0.5\%$ и в течение вегетационного периода не превышала 2.8–3.0%. Эту величину (3%) следует рассматривать как референсное значение смертности, не связанной с хищничеством, при оценивании негативных эффектов на зоопланктон Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС.

Наименьший уровень смертности планктона регистрировали на станциях, не подверженных тепловому воздействию подогретых вод (ст. 1) или подверженных минимально (ст. 7) — в среднем 1.6 и 0.9% соответственно. Более высокие значения смертности отмечали на станциях 3, 4 и 6 (2.9, 1.8 и 3.5% соответственно), максимальные — в зоне сброса теплых вод в р. Шача на ст. 5 (в среднем 8.3%). В отдельных случаях, летом, в период наибольших температур, имело место комбинированное влияние естественного и техногенного прогрева речных вод, вызывающего повышенную гибель планктона. Такую ситуацию наблюдали в

июле на фоновой ст. 4 (выше устьевой области р. Шача), когда в период сильного естественного прогрева в реку дополнительно поступали теплые воды ГРЭС (как прямоотком из сбросного канала с вышерасположенного участка, так и, вероятно, затоком из устьевой области р. Шача). В результате, смертность зоопланктона на этой фоновой станции в июле достигала аномально высокой величины (14.7%), статистически определяемой как выброс. С учетом этого, среднесезонная величина смертности зоопланктона на ст. 4 была 1.8%, что соответствует фоновым значениям.

Для статистической оценки значимости летального воздействия повышенных температур проведено тестирование на основе критерия Краскела–Уоллиса, по которому изменчивость показателя смертности планктона импактных станций, где идет приток подогретых вод, сравнивалась с таковой для участков с естественным термическим режимом или близким к нему (ст. 1, 7) (табл. 4). Результаты расчетов свидетельствуют об отсутствии статистически значимого влияния фактора подогретых вод на величину смертности планктона сбросного канала (ст. 3) и достоверном летальном эффекте повышенных температур в р. Шача (ст. 5, 6).

Результаты апостериорных тестов свидетельствуют о повышенной смертности планктона в низовьях устьевой области р. Шача (ст. 5), которая статистически значимо выше по сравнению со ст. 1 и 7, где преобладает естественный термический режим. Достоверные отличия смертности планктона на ст. 6 (р. Волга, ниже впадения р. Шача) от таковой на ст. 1 и 7 отсутствуют.

Рыбы. В пелагиали исследованного участка Горьковского водохранилища доминировала разновозрастная черноморско-каспийская тюлька *Clupeonella cultriventris* (Nordmann, 1840), на кото-

Таблица 4. Статистическая оценка значимости изменения уровня смертности зоопланктона в зоне влияния подогретых вод на основе *H*-критерия Краскела–Уоллиса

Показатель	ст. 1(ф) – ст. 3	ст. 1(ф) – ст. 5 и 6	ст. 7(ф) – ст. 5 и 6
<i>H</i>	0.519	8.769	9.534
<i>p</i>	0.470	0.012	0.008

Примечание. Фоновая станция (ф) – ст. 1 и ст. 7; станция в зоне влияния подогретых вод – ст. 3, 5 и 6. Жирным шрифтом выделены статистически значимые эффекты влияния подогретых вод при $p \leq 0.05$.

рую приходилось до 86% улова пелагического трала, менее многочисленными в уловах были разновозрастной судак (*Sander lucioperca* (L., 1758)) – 6% и чехонь (*Pelecus cultratus* (L., 1758)) – 3%. Остальную часть улова представляли рыбы из семейства карповых: лещ (*Abramis brama* (L., 1758)), елец (*Leuciscus leuciscus* (L., 1758)), язь (*L. idus* (L., 1758)), густера (*Blicca bjoerkna* (L., 1758)), уклейка (*Alburnus alburnus* (L., 1758)) – 5%.

По данным сетных уловов, в р. Шача при проведении исследований тюлька и чехонь отсутствовали, в основном, встречались карповые с доминированием плотвы, из окуневых преобладал обыкновенный окунь, встречался ерш.

Динамика плотности рыб на исследованной акватории Горьковского водохранилища обусловлена наличием обширных нерестилищ вдоль левого берега данного участка, с которых к концу лета стала выходить подросшая молодежь. Минимальная плотность рыб отмечена в мае: на участке поступления теплой воды из р. Кешка она была 1.5 ± 1.1 экз./га, у устья р. Шача – 36 ± 23 экз./га, в самой р. Шача зарегистрированы самые высокие плотности – 124 ± 54 экз./га, поскольку река в зоне подпора Горьковского водохранилища имеет относительно узкое русло и широкую залитую пойму с обширными нерестилищами фитофильных рыб. Осенью, по мере выхода подросшей молодежи в пелагиаль, плотность рыб на указанных участках возрастала до 1781 ± 1177 , 498 ± 395 и 2871 ± 1323 экз./га соответственно.

На горизонтальное и вертикальное распределение рыб в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС за пределами водоема охладителя в эстуарии р. Шача в значительной степени влияли изменения факторов среды, в первую очередь – фоновая температура воды на речном участке Горьковского водохранилища и в р. Шача (рис. 5). На рис. 5а представлена эхограмма распределения рыб в акватории р. Шача в июне. Моторная лодка с установленным на ней эхолотом пересекала реку от берега до берега пилообразными галсами. На данной эхограмме показано четырехкратное последовательное пересечение русла р. Шача на верхнем участке подпорной зоны реки. В этот период в нижнем слое воды в русле реки протекали стоковые воды с естественными температурами ($\sim 15^\circ\text{C}$), а по поверхности распро-

странялись теплые сбросные воды Костромской ГРЭС ($\sim 18^\circ\text{C}$). В этих условиях рыбы избирали теплый поверхностный слой. В конце июля на этом же участке, когда фоновые температуры достигли летних значений ($\sim 24^\circ\text{C}$), а сбросные воды превышали их на $2\text{--}4^\circ\text{C}$, вертикальное распределение рыб стало более равномерным по всей толще (рис. 5б). В это же время на участке реки, куда поступала вода с более высокой температурой (до 32°C), рыба предпочитала находиться в нижних горизонтах, где температура воды была более умеренной (рис. 5в). Картина вертикального распределения рыб, наблюдавшаяся в июне, повторилась осенью (рис. 5г), когда в нижние горизонты стала опять поступать вода с низкими естественными температурами (0.2°C). Скопления рыб в осенний период распределялись в поверхностном слое, в котором распространялась теплая сбросная вода с температурой ($3.2\text{--}4.5^\circ\text{C}$).

Сходное распределение рыб в зависимости от температуры наблюдали и на участке Горьковского водохранилища, примыкающего к устью р. Шача, куда поступала теплая вода из водоема-охладителя в дельте р. Шача. В летний период на фоне летних фоновых температур ($24\text{--}25^\circ\text{C}$) в 500 м от места поступления подогретых вод из водоема-охладителя регистрировали равномерное распределение рыб по глубине (рис. 5д). Осенью, когда фоновые температуры снизились до 0.2°C , рыбы на этом же участке избирали верхний четырехметровый слой с температурами $\sim 4^\circ\text{C}$ (рис. 5е).

Горизонтальное распределение рыб в р. Шача и на участке Горьковского водохранилища, примыкающего к устью р. Шача, как и вертикальное распределение, в значительной степени зависело от сезонной динамики фоновых температур воды.

Отепляющий эффект от сбросных вод, поступающих из водоема-охладителя, в дельте р. Шача не распространяется на стрелневую часть русла и пойму левого берега (рис. 2). Теплые воды поступают вниз по течению по правобережной пойме.

Гидроакустическая съемка на участке Горьковского водохранилища, расположенного ниже устья р. Шачи, через которое происходит сброс отепленной воды из водоема-охладителя, показала, что распределение рыбы по ширине этого участка неравномерно. В центральной части акватории с максимальными глубинами над затоп-

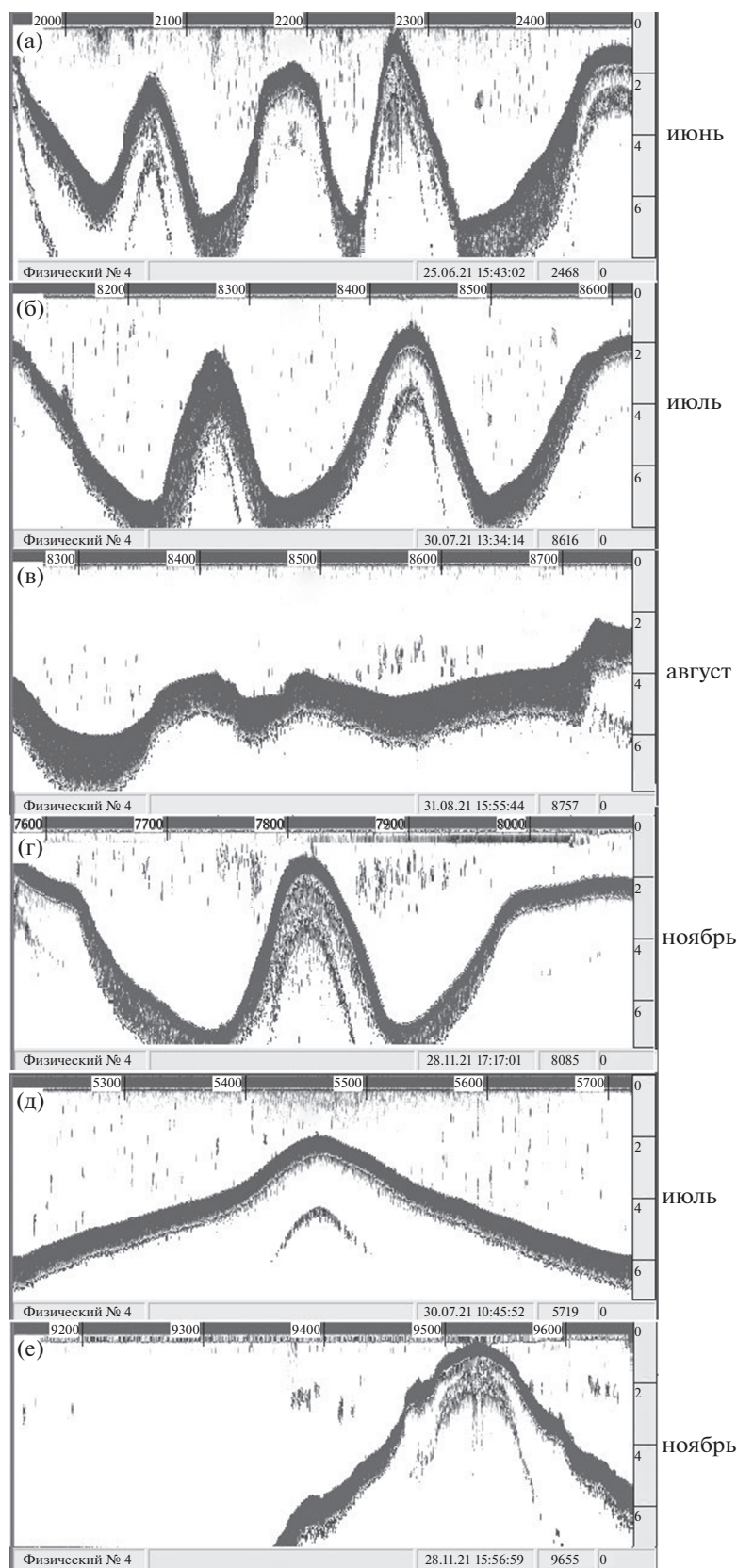


Рис. 5. Вертикальное распределение рыб в акватории р. Шача от верхней границы влияния теплых вод Костромской ГРЭС до устья (а–г) и в акватории участка Горьковского водохранилища, примыкающего к устью р. Шача (д, е) по данным ежемесячных гидроакустических съемок. На вертикальной шкале глубина (м) на обследуемом участке, на верхней горизонтальной шкале количество посылок гидроакустических сигналов с начала съемки, на нижней горизонтальной шкале дата проведения съемки и время съемки на приводимом на рисунке участке. Описание дано в тексте.

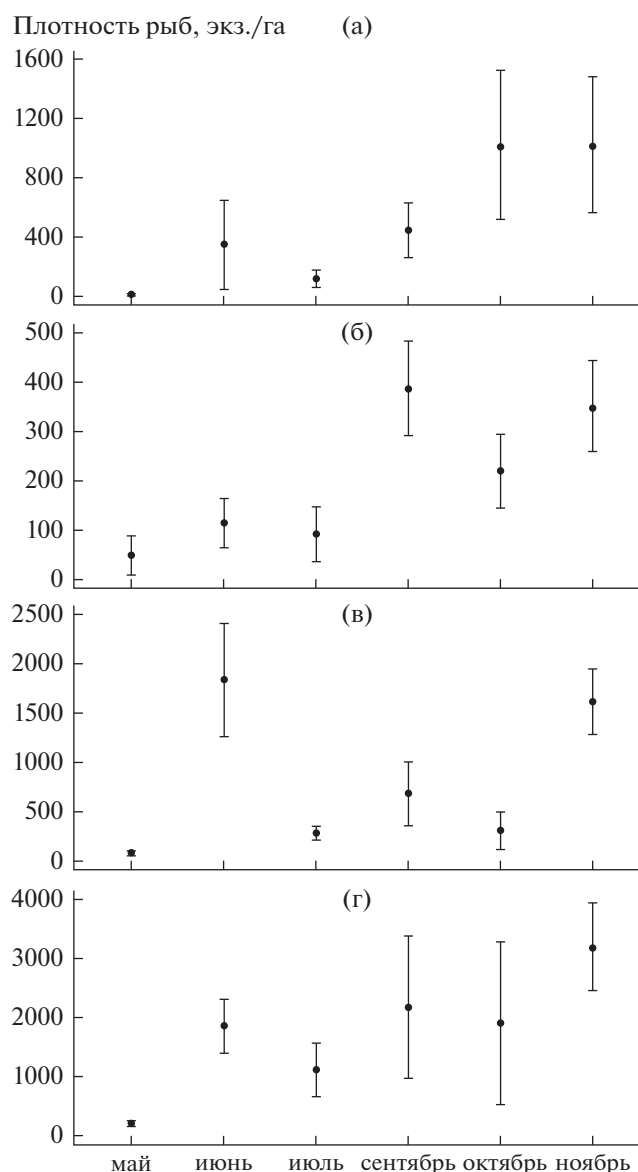


Рис. 6. Динамика плотности рыб в вегетационный период (май–ноябрь) 2021 г. на участке Горьковского водохранилища, примыкающего к устью р. Шача: а – у левого берега ниже дельты, б – у правого берега ниже дельты, в – нижняя часть зоны подпора, г – верхняя часть зоны подпора.

ленным руслом р. Волга доминировали особи размерной группы 30–100 мм, в этих скоплениях преобладала разноразмерная тюлька. В пойме левого берега с июня начала появляться молодь фитофильных видов рыб, которая выходила из мелководных заливов вдоль левого берега, где располагались их обширные нерестилища. При этом в начале лета доминировали особи длиной <30 мм, к осени подросшая молодь была представлена в скоплениях самой многочисленной размерной группой 30–50 мм. В период с мая по сентябрь за счет этой молоди плотность рыб была достоверно

выше у левого берега, куда не распространяется тепляющий эффект, – 562 ± 486 экз./га, у правого берега она была гораздо ниже – 61 ± 45 экз./га ($K-S$ statistic = 3.16, при $p < 0.05$) (рис. 6). В октябре плотности сравнялись – 265 ± 137 и 243 ± 138 экз./га соответственно. В ноябре, когда фоновые температуры воды снизились до 0.1°C , а на участке ниже впадения р. Шача за счет поступления теплой воды они были выше фоновых на $3\text{--}6^\circ\text{C}$ (рис. 3), плотность рыб на теплом акватории у правого берега достоверно превышала (1400 ± 1122 экз./га) таковую в пойме у левого берега (71 ± 41 экз./га) ($K-S$ statistic = 1.56, $p < 0.05$). Доминировали особи размером 30–50 мм и 50–100 мм.

На акватории р. Шача в пределах зоны подпора были выделены два участка – нижний, который выполняет функцию водоема-охлаждителя Костромской ГРЭС и верхний, куда распространяется остывающая сбросная вода (рис. 2, рис. 3). В летний период до 50% рыбного населения представляла молодь с речных нерестилищ размером <30 мм. Она появилась в июне, и ее распределение по участку подпора реки было относительно равномерным. Средняя численность на нижнем и верхнем участках достоверно не различалась – 2417 ± 1158 и 2100 ± 904 экз./га ($K-S$ statistic = 0.56, $p = 0.78$) (рис. 6). Однако в июле при прогреве воды на нижнем участке $>31^\circ\text{C}$ наблюдали перераспределение рыб по акватории реки. Численность рыб на нижнем участке стала достоверно ниже, чем на верхнем, – 284 ± 145 и 1339 ± 472 экз./га соответственно ($K-S$ statistic = 2.06, $p < 0.05$). К осени подросшая молодь перешла в размерную группу 30–50 мм, из рыб старшего возраста доминировали особи размером 50–100 мм. Подобная картина распределения рыб на этих участках сохранилась и в сентябре (685 ± 654 и 2413 ± 1044 экз./га) ($K-S$ statistic = 1.62, $p < 0.05$) и в ноябре (309 ± 390 и 2148 ± 2834 экз./га) ($K-S$ statistic = 2.37, $p < 0.05$). В ноябре, при снижении фоновой температуры до 0.2°C , численность рыб на этих участках повысилась. В верхней части нижнего участка, где температура достигала 10°C она увеличилась до 1614 ± 671 экз./га. На верхнем участке, где температура была ниже – от 5 до 2.5°C численность достигла 3638 ± 2091 экз./га ($K-S$ statistic = 1.92, $p < 0.05$). Динамика общей плотности рыб в реке обусловлена миграционным поведением, и в первую очередь – покатыми миграциями ранней молоди наиболее многочисленной части рыбных скоплений в реке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зоопланктон Горьковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Костромской ГРЭС имеет сравнительно богатый таксономический состав с преобладанием видов вседневного и бо-реально-арктического распространения, харак-

теризуется повышенной долей фитофильных и планктобентосных форм. Значимая компонента фауны (25% таксономического списка) представлена видами, тяготеющими к мезоэвтрофным водам. Зоопланктон в зоне сброса подогретых вод отличается своеобразным таксономическим составом и в некоторых местах (низовья устьевой области р. Шача) пониженным видовым богатством, которое, однако, быстро возвращается к исходным значениям на нижерасположенном участке реки.

В отношении количественных параметров (видовое богатство, удельное разнообразие, численность, биомасса, продукция) сообщества демонстрируют разнонаправленную реакцию на приток теплых вод. В одном случае (сбросной канал р. Кешка, куда слабоподогретые воды ГРЭС поступают периодически) наблюдается тенденция к стимулирующему воздействию на планктон, во втором (низовья устьевой области р. Шача, где осуществляется хронический сброс сильно прогретых вод) — его угнетению относительно фоновых показателей.

Данные статистического анализа свидетельствуют об отсутствии экологически значимых эффектов сброса теплых вод для планктона сбросного канала (ст. 1–3), угнетающем влиянии в отношении снижения численности и биомассы (но не разнообразия и продуктивности) планктона низовий устьевой области р. Шача (ст. 4–7). В последнем случае угнетение планктона в водоем-приемнике р. Шача носит сезонный характер: проявляется в весенне-летний период и сглаживается осенью. Однако, учитывая высокие темпы размножения и короткоцикличность развития беспозвоночных планктона, эти потери быстро компенсируются.

В условиях воздействия подогретых вод ГРЭС наблюдается тенденция к увеличению смертности планктона относительно фоновых величин. Летальное действие теплых вод на зоопланктон усиливается в летний период, когда на естественный прогрев реки накладывается влияние подогретых вод ГРЭС. Осенью отепляющий эффект подогретых вод, наоборот, способствует лучшей выживаемости организмов. Результаты статистического анализа указывают на достоверно повышенную относительно референсных значений смертность планктона низовий устьевой области р. Шача. Смертность планктона на других станциях статистически неотличима от таковой на фоновых участках рек Волга и Шача.

В целом, это свидетельствует об отсутствии экологически значимого летального эффекта на планктон проточной водной системы. Протекающая вода с содержащимся в ней планктоном смешивается с теплой водой, сбрасываемой из водоема-охладителя, что приводит к понижению количе-

ственных и качественных показателей дрейфующих организмов. Однако эти показатели быстро возвращаются к исходным значениям на нижерасположенном участке реки, где происходит дальнейшее охлаждение сбрасываемой воды, характерное для речных водоемов-приемников теплой воды (Животова, 2007а). На участках с умеренным прогревом наблюдается тенденция к стимулирующему воздействию на планктон, что отмечают и другие авторы (Мощенко и др., 2011; Хозяйкин, 2011; Зиновьев, 2017; Кривенкова, 2017).

В отличие от планктонных организмов, летальный эффект воздействия повышенных температур на рыб не отмечен. Это связано с более высокой плавательной способностью рыб, позволяющей им избегать неблагоприятные температурные воздействия.

В отличие от водоемов-охладителей озерного типа, где в относительно замкнутых и устойчивых условиях формируется специфический ихтиоценоз (Лунева, 2014; Gorlacheva, 2015; Горлачева, Афонин, 2017; Девятков и др., 2017), в речных водоемах, куда поступает подогретая вода из водоемов-охладителей, тепловое воздействие носит локальный характер и проявляется в непосредственной близости к выпускам отепленных вод. В таких водоемах ихтиофауна не приобретает специфические черты, а перераспределяется в соответствии с сезонными изменениями температурных условий. Наиболее выраженное избирание отепленных вод наблюдается в весенний и осенний периоды, до начала естественного прогрева или при понижении естественных температур. В этих условиях рыбы избегают участков с перегретой или охлажденной до естественных температур водой, избирая умеренно отепленные участки.

По мнению Животовой (2007) и Вандыш (2012), влияние умеренно подогретых сбросных вод на животный и растительный мир, — в целом, положительный фактор. Гораздо более негативное воздействие оказывают недостаточно очищенные хозяйственно бытовые и промышленные стоки.

Выводы. В условиях воздействия подогретых вод Костромской ГРЭС наблюдается увеличение смертности планктона относительно фоновых значений. В наибольшей степени летальное действие теплых вод на зоопланктон проявляется в летний период, когда на естественный прогрев реки накладывается влияние подогретых вод ГРЭС. По результатам статистического анализа установлена достоверно повышенная относительно референсных значений смертность планктона низовий устьевой области р. Шача (ст. 5) — технологического водоема-приемника. Смертность планктона на других станциях статистически неотличима от таковой на фоновых участках рек Волга и Шача, что свидетельствует об отсут-

ствии экологически значимого летального эффекта на планктон проточной водной системы. Протекающая вода с содержащимся в ней планктоном смешивается с теплой водой, сбрасываемой из водоема-охладителя. Это приводит к понижению количественных и качественных показателей дрейфующих организмов, которое, однако быстро возвращается к исходным значениям на нижерасположенном участке реки, где происходит дальнейшее охлаждение сбрасываемой воды. На участках с умеренным прогревом наблюдается тенденция к стимулирующему воздействию на планктон. В отличие от планктонных организмов, в условиях воздействия подогретых вод Костромской ГРЭС летальный эффект воздействия повышенных температур на рыб не отмечен. Это связано с более высокой плавательной способностью рыб, позволяющей им избегать участки акватории с неблагоприятным температурным фоном. В весенний и осенний периоды, до начала естественного прогрева или при понижении естественных температур у рыб наблюдается активное избирание отепленных вод. Они избегают участков акватории с перегретой или охлажденной до естественных температур водой, избирая умеренно отепленные участки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена в рамках Госзаданий № 121051100104-6 “Биоразнообразие, структура и функционирование пресноводных рыб континентальных водоемов и водотоков” и № 121051100109-1 “Систематика, разнообразие, биология и экология водных и околводных беспозвоночных, структура популяций и сообществ в континентальных водах”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вандыш О.И.* 2012. Особенности ответных реакций зоопланктонного сообщества на воздействие сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса и подогретых вод атомных электростанций (на примере субарктического озера Имандра) // Тр. Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 2. С. 6.
- Вербицкий В.Б., Курбатова С.А., Вербицкая Т.И.* 2017. Реакции зоопланктона на температурные воздействия. I. Динамика численности популяций *Cladocera* при неперiodических изменениях температуры // Тр. ИБВВ РАН. Вып. 78(81). С. 14.
- Герасимова А.А., Герасимов А.Г., Шаранова Т.А.* 2021. Колониальные беспозвоночные в зооперифитоне водоема-охладителя ТЭЦ (Западная Сибирь) // Биология внутр. вод. № 3. С. 253. <https://doi.org/10.31857/S0320965221020042>
- Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища. 2015. Ярославль: Филигрань. 465 с.
- Голованов В.К.* 2013. Температурные критерии жизнедеятельности пресноводных рыб. Москва: Полиграф-плюс. 300 с.
- Горлачева Е.П., Афонин А.В.* 2017. Характеристика ихтиофауны водоемов-охладителей Забайкальского края. Экология водоемов – охладителей энергетических станций: Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита: Забайкал. гос. ун-т. С. 317.
- Девятков В.И., Евсеева А.А., Куанышбекова Г.К.* 2017. Зоопланктон, макрозообентос и ихтиофауна водоемов-охладителей экибастузских ГРЭС // Экология водоемов – охладителей энергетических станций: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита: Забайкал. гос. ун-т. С. 65.
- Животова Е.Н.* 2007а. Влияние атомной электростанции на зоопланктон охлаждающих водоемов (на примере Нововоронежской АЭС): Автореф. Дис. ... канд. биол. наук. Воронеж.
- Животова Е.Н.* 2007б. Использование зоопланктона в биоиндикации теплового загрязнения водоемов-охладителей АЭС // Вестник Воронежский гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. № 1. С. 94.
- Зиновьев Е.А., Китаев А.Б., Носков В.М.* 2017. Влияние сбросов теплых вод Пермской ГРЭС на гидроэкологическую обстановку в Камском водохранилище // Экология водоемов – охладителей энергетических станций: Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита: Забайкал. гос. ун-т. С. 137.
- Кривенкова И.Ф.* 2017. Влияние тепловой электростанции на зоопланктон озера Кенон. Экология водоемов – охладителей энергетических станций: Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита: Забайкал. гос. ун-т. С. 158.
- Лунева Е.В.* 2014. Оценка влияния атомных электростанций России на экосистемы водоемов-охладителей // Изв. Калининградского гос. техн. ун-та. № 34. С. 20.
- Методика изучения биоценозов внутренних водоемов. 1975. М.: Наука. 240 с.
- Мочек А.Д., Павлов Д.С.* 2021. Сравнительный анализ распределения рыб в лимнических и лотических водных объектах (Обзор) // Биология внутр. вод. № 2. С. 179. <https://doi.org/10.31857/S032096522102011X>
- Мощенко А.В., Касьян В.В., Звягинцев А.Ю.* 2011. Общая характеристика и сезонная динамика веслоногих ракообразных в водозаборном ковше и месте сброса отработанных вод Владивостокской ТЭЦ-2. Условия обитания промысловых объектов // Изв. ТИНРО. Т. 165. С. 117.
- Протасов А.А., Силаева А.А.* 2012. Контурные группировки гидробионтов в техно-экосистемах ТЭС и АЭС. Киев: Институт гидробиологии НАН Украины.
- Семенова А.С.* 2010. Индикаторная роль зоопланктона в оценке экологического состояния Куршского залива: Дис. ... канд. биол. наук. Борок. 280 с.
- Хозяйкин А.А.* 2011. Влияние слабого теплового воздействия на популяционно-динамические характеристики массовых видов планктонных ракообразных

- (на примере водоема-охладителя Пермской ГРЭС): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок. 24 с.
- Geraldes A.M., Boavida M.J. 2004. What factors affect the pelagic Cladocerans of the mesoeutrophic Azibo reservoir? // *Ann. Limnol.* V. 40. № 2. P. 101. <https://doi.org/10.1051/limn/2004008>
- Gorlacheva E.P. 2015. Ichthyocenoses caratterizzazione trofici alcuni laghi Chitines-Ingodinsky depressione // *Italian Sci. Rev.* V. 29. № 8. P. 40. <https://doi.org/10.1051/limn/2004008>
- Havens K.E., Pinto-Coelho R.M., Beklioglu M. et al. 2014. Temperature effects on body size of freshwater crustacean zooplankton from Greenland to the tropics // *Hydrobiologia*. V. 743. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2000-8>
- Kishi D., Murakami M., Nakano S., Maekawa K. 2005. Water temperature determines strength of top-down control in a stream food web // *Freshwater Biol.* V. 50. P. 1315. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01404.x>
- Sladeczek V. 1973. System of water quality from biological point of view // *Arch. Hydrobiol.* Bd 7. H. 7. S. 808.
- Tappa D.W. 1965. The Dynamics of the Association of Six Limnetic Species of *Daphnia* in Aziscoos Lake, Maine // *Ecol. Monogr.* V. 35. P. 395. <https://doi.org/10.2307/1942148>

Abundance, Distribution and Mortality of Hydrobionts in the Section of the Gorky Reservoir Affected by Heated Waters of the Kostroma Hydroelectric Power Plant

Yu. V. Gerasimov¹, *, S. E. Bolotov¹, A. I. Tsvetkov¹, and E. S. Borisenko²

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

²*Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: gu@ibiw.ru

The study was conducted in the river section of the Gorky reservoir in the zone affected by the heated water discharge from the Kostroma hydroelectric power plant during the growing season (May–November) 2021. The reduced species richness was observed in the sites of the maximum water heating, which, however, quickly returned to the initial values in the downstream section of the river. The lethal effect of warm waters on zooplankton is mainly manifested in the summer, when the natural warming of the river waters is influenced by the heated water discharge from the Kostroma hydroelectric power plant. In autumn, the warming effect of heated waters, on the contrary, promotes better survival of organisms. Fish reach a high abundance in the study area by the end of summer, when the grown juvenile sleeve shallow waters. In the autumn period, the fish redistribution and a significant increase in the abundance occur in the area of heated waters compared to the back ground sites. The results obtained indicate the absence of an environmentally significant lethal effect. Local plankton losses are quickly compensated due to high reproduction rates and short-cycle development of invertebrates. The lethal effect of exposure to high temperatures on fish was not found.

Keywords: hydroelectric power plant, thermal pollution, zooplankton composition, mortality, fish population, seasonal dynamics of density, distribution