

УДК 574.632:574.633

Д. В. Кулаков¹, М. Е. Макушенко¹, Е. А. Верещагина²

**ВЛИЯНИЕ СБРОСА ПОДОГРЕТЫХ ВОД АТОМНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ЗООПЛАНКТОН
РАЗНОТИПНЫХ ВОДОЕМОВ³**

В двух разнотипных водоемах-охладителях атомных электростанций, расположенных в разных водосборных бассейнах, различающихся по гидрографическим характеристикам и составу зоопланктона, наблюдались различия в отклике планктонных беспозвоночных на техногенное воздействие. В Копорской губе, являющейся частью акватории Финского залива, сброс подогретых вод Ленинградской атомной электростанции приводил к сокращению количественных показателей зоопланктона. В водоеме-охладителе Белоярской атомной электростанции, созданном на р. Пышме, подогрев в большинстве случаев благоприятствовал увеличению численности и биомассы планктонных беспозвоночных. В обоих исследованных водоемах воздействие АЭС способствовало уменьшению общего количества видов зоопланктона. Основу численности и биомассы составляли пелагические виды с широким или всесветным распространением.

Ключевые слова: зоопланктон, Ленинградская АЭС, Копорская губа, Белоярская АЭС, Белоярское водохранилище, водоем-охладитель, техногенное воздействие.

Сооружение и эксплуатация атомных электростанций (АЭС), относящихся к категории крупных промышленных объектов с большим потреблением воды, оказывает комплексное влияние на экосистемы близлежащих акваторий [11]. Ведущую роль в этом воздействии играет температурный фактор. В результате сброса подогретых вод происходит «термическое эвтрофирование» водоема-охладителя [1], изменяются условия существования биоты, наблюдаются структурные и функциональные трансформации в гидробиоценозах. Однако, при известных общих закономерностях развития сообществ водных организмов, экосистема каждого конкретного водоема-охладителя индивидуальна и имеет свою специфику [3, 4].

Одним из важнейших компонентов водного биоценоза, активно участвующим в процессах деструкции органического вещества и составляющим значительную часть рациона рыб, является зоопланктон. Планктонные животные чутко реагируют на изменения, происходящие в водной среде, в том числе под воздействием антропогенных факторов, и используются в качестве индикаторов экологического состояния водоема [14].

³ Работа выполнена в рамках проекта СПбГУ 3.19.6.2016.

© Д. В. Кулаков, М. Е. Макушенко, Е. А. Верещагина, 2017

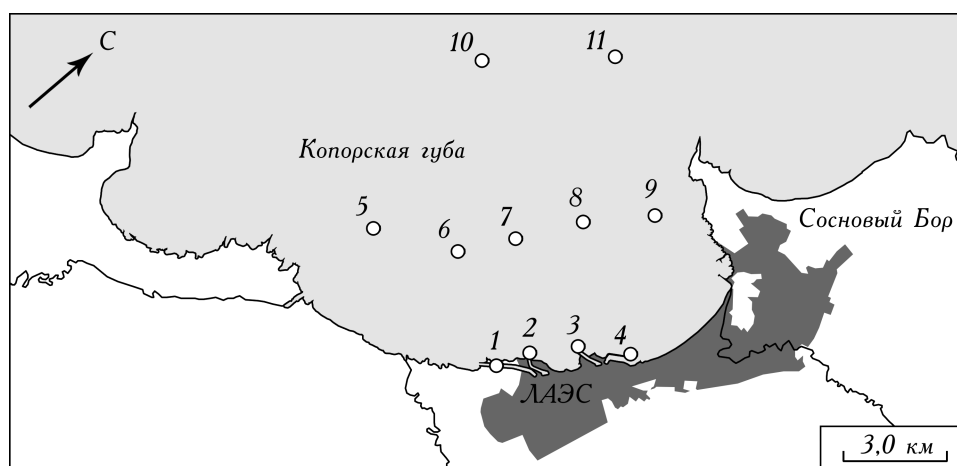
Исследования зоопланктона в условиях влияния АЭС выполнялись в Копорской губе Финского залива, воды которой используются для охлаждения Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС) [8], и в Белоярском водохранилище — водоеме-охладителе Белоярской атомной электростанции (БАЭС) [6]. Специфика развития сообществ планктонных животных в исследованных водоемах определялась морфометрическими и гидрологическими параметрами водных объектов.

Цель работы — сравнительный анализ зоопланктона двух разнотипных водоемов, испытывающих воздействие теплового сброса атомных электростанций.

Материал и методика исследований⁴. Копорская губа является частью акватории Финского залива и испытывает антропогенную нагрузку, связанную с воздействием расположенных на морском побережье предприятий городской инфраструктуры (г. Сосновый Бор) и атомно-промышленного комплекса. Копорская губа служит водоемом-охладителем ЛАЭС, использующей в год для охлаждения 4,4—5,3 км³ воды. Сброс подогретых вод осуществлялся с первого и второго энергоблоков (I очередь) и с третьего и четвертого энергоблоков (II очередь) с уран-графитовыми ядерными реакторами канального типа на тепловых нейтронах (РБМК-1000) (электрическая мощность каждого реактора — 925 МВт). В Копорской губе протяженность зоны экстремального техногенного воздействия не превышала нескольких сотен метров от сбросных каналов. Поскольку объемы теплых сбросов были значительно меньше по сравнению с объемами вод Финского залива, происходило интенсивное перемешивание водных масс, и на расстоянии 3—5 км от ЛАЭС изменения температуры не превышали в среднем 1,0°C от фоновых значений. Отбор проб выполняли ежемесячно с апреля по сентябрь в 2010—2015 гг. Станции отбора проб (ст.) располагались в сбросных каналах ЛАЭС (ст. 1, 4) и необогреваемой акватории Копорской губы, включающей водозаборные каналы ЛАЭС (ст. 2, 3) и открытую часть водоема (ст. 5—11) (рис. 1).

Белоярское водохранилище расположено в Свердловской области (площадь акватории составляет 38 км²), создано в 1963 г. на р. Пышма как водоем-охладитель БАЭС, подвержено антропогенной нагрузке в связи с поступлением в акваторию водоема вод р. Пышма, загрязненных бытовыми веществами, стоком с территории г. Заречный и сбросом теплых вод БАЭС. В период исследований сброс подогретых вод осуществлялся с 3 энергоблока БАЭС с энергетическим реактором на быстрых нейтронах (БН-600) (электрическая мощность — 600 МВт). 4 энергоблок с реактором БН-800 находился в процессе строительства и не оказывал теплового воздействия на водоем. Первые два энергоблока выведены из эксплуатации в 1980-х гг. в связи с выработкой ресурса. В Белоярском водохранилище площадь, занимаемая теплым водным потоком, составляла до 1 км² или 3% от площади водохранилища. Область теплового воздействия в непосредственной близости от водо-

⁴ Авторы выражают благодарность сотрудникам Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН, принимавшим участие в организации полевых работ и отборе проб.

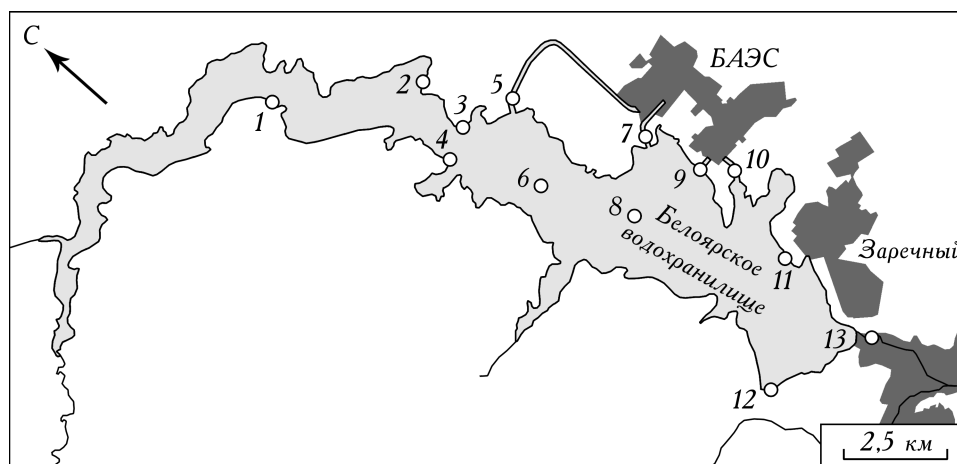


1. Расположение станций отбора проб в Копорской губе Финского залива.

выпуска имела непостоянные границы, зависящие в основном от тепловой нагрузки БАЭС и направления ветра. Тем не менее, даже при самых неблагоприятных условиях, температура воды в нижней части водохранилища не превышала естественную более чем на 1—2°C. Пробы отбирались раз в месяц с июня по октябрь в 2012—2014 гг. Станции отбора проб размещались в сбросном канале энергоблока БН-600 (ст. 10) и необогреваемой акватории (ст. 1—9, 11—13), включающей строящиеся каналы энергоблока БН-800 (водозабор — ст. 7, водосброс — ст. 5) и действующий водозаборный канал энергоблока БН-600 (ст. 9) (рис. 2).

Отбор проб зоопланктона осуществляли путем фильтрования 50—100 л воды через газ с размером ячеек 64 мкм. Пробы фиксировали 70°-ным этиловым спиртом. Камеральную обработку проводили по стандартной методике [9] с использованием соответствующих определителей [7, 13]. Зоопланктон оценивали по видовому составу, численности, биомассе, доле таксономических групп от общей численности и биомассы. Видовое разнообразие сообществ определяли по информационному индексу Шеннона — Уивера, рассчитанному по численности (H_N , бит/экз) и биомассе (H_B , бит/г) [19]. Оценку трофо-сапробиологического состояния водных объектов выполняли с использованием индекса сапробности Пантле — Букк в модификации Сладечека (S) [20] и фаунистического коэффициента трофности Мязметса (E) [12]. Сходство видового состава зоопланктона исследованных водных объектов и разных зон водоемов определяли при помощи коэффициента Серенсена [2]. Доминирующими считали таксоны, составляющие $\geq 10\%$ общей численности и биомассы.

Гидрохимический анализ проб воды выполняли в аккредитованных лабораториях г. Санкт-Петербурга (НПО «Тайфун» и ЗАО «Региональный аналитический центр Механобр инжиниринг аналит») по стандартным методикам.



2. Расположение станций отбора проб в Белоярском водохранилище.

Результаты исследований

Содержание химических элементов в водах разнотипных водоемов-охладителей подвергалось сезонной динамике, более выраженной в Белоярском водохранилище, являющемся континентальным водоемом.

Техническое водоснабжение ЛАЭС осуществлялось морской водой по прямоточной схеме, поэтому воды Копорской губы, сбросных и водозаборных каналов действующей ЛАЭС были практически идентичны по химическому составу. Воды относились к солоноватым, эстуарным, хлоридно-натриевым, со средней минерализацией $3,5 \text{ г/дм}^3$. Значение рН воды близко к 8,0.

Содержание взвешенных веществ составляло в среднем $14,2 \pm 13,4 \text{ мг/дм}^3$, максимум в 269 мг/дм^3 зафиксирован в сентябре 2013 г., минимальные значения ($< 3 \text{ мг/дм}^3$) были характерны для конца весеннего — начала летнего периода. Значения БПК₅ варьировали от $< 0,5$ до $102,0 \text{ мгО/дм}^3$ (в среднем $23,8 \pm 19,4 \text{ мг/дм}^3$), с максимумом в сентябре 2010 г. и минимальными значениями весной 2013 г. Наибольшую долю в степень загрязненности вод вносили аммонийный и нитритный азот, общее железо и растворенные органические вещества, определяемые по показателю химического потребления кислорода (ХПК) в воде. Средний температурный перепад между заборной и сбросной водой достигал наибольших значений в апреле — до $10,2^\circ\text{C}$ (табл. 1).

Воды Белоярского водохранилища по химическому составу соответствовали гидрокарбонатному классу кальциевой группы первого типа. Величина минерализации варьировала от $0,18$ до $0,45 \text{ г/дм}^3$. Значение водородного показателя рН изменялось в пределах от $6,7$ до $9,0$.

1. Среднемесячная температура воды в необогреваемой акватории водоемов и в сбросных каналах атомных станций

Объект	Участок	Месяц						
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Копорская губа	A	8,9 ± 1,5	11,6 ± 3,3	16,6 ± 1,0	19,9 ± 1,3	21,2 ± 0,6	17,8 ± 0,6	—
	B	19,1 ± 2,0	21,1 ± 1,6	23,6 ± 1,7	26,3 ± 2,1	24,8 ± 2,7	24,2 ± 1,6	—
Белоярское водохранилище	A	—	—	19,8 ± 0,2	22,2 ± 0,8	20,5 ± 1,5	16,0 ± 1,2	9,2 ± 0,3
	B	—	—	25,0 ± 0,0	30,6 ± 0,0	34,0 ± 0,0	23,2 ± 3,1	9,8 ± 0,0

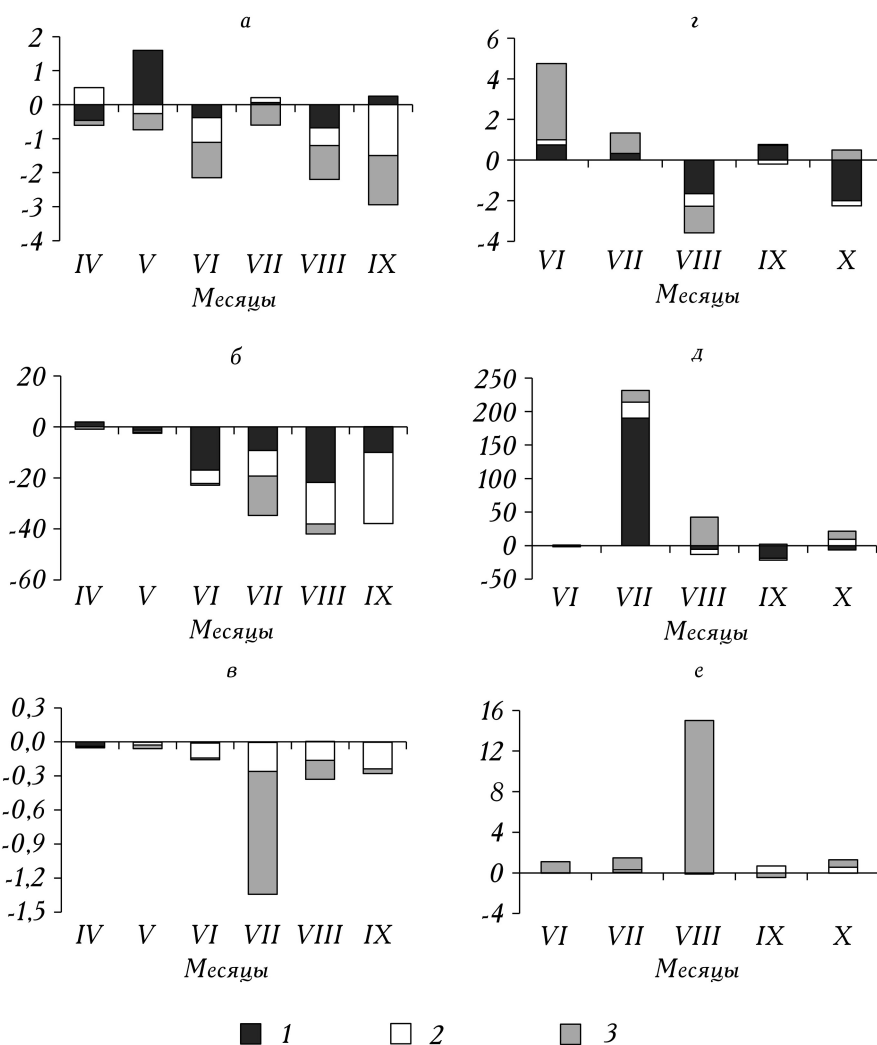
Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: А — необогреваемая акватория; В — сбросные каналы. «—» — исследования не проводились.

Во всех пробах воды Белоярского водохранилища зафиксировано превышение порога высокого загрязнения по величине показателя ХПК (от 15,4 до 32,6 мг О/дм³, в среднем 33,0 мг О/дм³) и высокие значения показателя БПК₅ (от 0,5 до 18,2 мг О/дм³, в среднем 9,5 мг О/дм³). Для сбросных вод, относительно заборной воды, было характерно повышенное содержание органических веществ (по показателю ХПК), связанное с технологическими особенностями системы водоотведения с БАЭС (смешение вод, используемых в различных технологических циклах станции, в том числе коммунально-бытовых стоков БАЭС).

Концентрация биогенных элементов зависела от расхода воды и сезона года: превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) регистрировалось в летний период, при снижении расхода воды. Весной, в связи с интенсивным разбавлением в период половодья и снеготаяния, превышений ПДК не выявлено. Обратная картина наблюдалась для концентрации общего железа, увеличение содержания которого происходило в весенний период, при повышении поверхностного стока с заболоченных водосборов.

В Белоярском водохранилище происходило перераспределение содержащихся в воде тяжелых металлов и переход их в донные отложения, в основном в виде комплексных соединений железа. Разница между температурой воды в сбросном канале БАЭС и в среднем по необогреваемой акватории достигала наибольших значений в августе — до 13,5° (см. табл. 1).

В обоих исследованных водоемах видовое богатство зоопланктона в сбросных каналах АЭС было ниже, чем в необогреваемой акватории (табл. 2). Однако в Белоярском водохранилище в большинстве случаев сброс теплых вод БАЭС способствовал увеличению среднего количества видов в пробе (рис. 3, табл. 3), в то время как в Копорской губе в сбросных каналах ЛАЭС в основном происходило сокращение значений данного показателя.



3. Изменение среднего количества видов в пробе (а, з), численности (б, д) и биомассы (в, е) зоопланктона в сбросных каналах АЭС относительно показателей в необогреваемой акватории Копорской губы (а, б, в) и Белоярского водохранилища (з, д, е). Здесь и на рис. 4: 1 — Rotifera; 2 — Copepoda; 3 — Cladocera.

В зоопланктоне необогреваемой акватории Копорской губы и сбросных каналов ЛАЭС как по численности, так и по биомассе доминировали *Asplanchna priodonta* Gosse, *Euchlanis dilatata lucksiana* Hauer, *Keratella cochlearis baltica* (Imhof), *K. quadrata platei* Jägerskiöld, *Bosmina (Bosmina) longirostris* (O. F. Müller), *B. (Eubosmina) coregoni maritima* (P. E. Müller), *Acartia tonsa* Dana, *Cyclops vicinus* Uljanin, *Eurytemora lacustris* (Poppe) и ювенильные особи Calanoida и Cyclopoidea. Только в сбросных каналах ЛАЭС встречались *Bipalpus hudsoni* (Imhof), *Brachionus quadridentatus* Hermann, *Lecane lunaris* (Ehrenberg), *Notommata collaris* Ehrenberg, *Testudinella patina* (Hermann), *Tri-*

2. Видовое богатство зоопланктона Копорской губы и Белоярского водохранилища

Объекты	Участок	Rotifera	Copepoda	Cladocera	Всего
Копорская губа	А	24	19	22	65
	В	19	9	10	38
Белоярское водохранилище	А	24	10	26	60
	В	8	4	14	26

chocerca capucina (Wierzejski & Zacharias). Тем не менее, на водосбросе из зоопланктона выпадали организмы, испытывающие наиболее сильные повреждения при прохождении через охлаждающие агрегаты ЛАЭС: *Leptodora kindtii* Focke, *Diaphanosoma brachyurum* (Liévin), *Cercopagis pengoi* (Ostroumov), *Ceriodaphnia quadrangula* O. F. Müller, *Bosmina (Eubosmina) coregoni* Baird, *Macrocyclops albidus* (Jurine), *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg), *Eu.gracilis* (G. O. Sars), *Cyclops scutifer* Claus, *Acanthodiptomus denticornis* (Wierzejski).

В сбросных каналах ЛАЭС, по сравнению с необогреваемой акваторией Копорской губы, наблюдалось уменьшение численности и биомассы зоопланктона в среднем в 3,5 раза (см. табл. 3), при этом численность ветвистоусых ракообразных снижалась в среднем в 2,7 раза, биомасса — в 3,9 раза, численность и биомасса веслоногих ракообразных уменьшались в среднем в 3,3 раза, коловраток — в 1,5 раза. Наиболее заметное сокращение численности происходило в период с июня по сентябрь (см. рис. 3), когда в необогреваемой акватории Копорской губы массово развивались *Keratella cochlearis baltica* (до 37,0% от общей численности сообщества), *K. quadrata platei* (до 54,4%) и науплиусы веслоногих ракообразных (до 77,1%). Наибольшее сокращение биомассы происходило в июле, когда в акватории, не подвергающейся подогреву, массового развития достигала *Bosmina (Eubosmina) coregoni maritima* (до 86,5% от общей биомассы).

В необогреваемой акватории Копорской губы и сбросных каналах ЛАЭС наибольшим количеством видов были представлены коловратки (рис. 4). По численности эта группа беспозвоночных также занимала лидирующее положение (вне зоны подогрева — в среднем 56,8%, на водосбросе — 47,6%), в сентябре наблюдалось сокращение доли численности коловраток в сообществе за счет развития веслоногих ракообразных. По биомассе в разные сезоны года в необогреваемой акватории Копорской губы и сбросных каналах ЛАЭС первенствовали ветвистоусые и веслоногие ракообразные, за исключением апреля, когда доля биомассы коловраток вне зоны подогрева была наибольшей (64,8%).

В необогреваемой акватории Белоярского водохранилища и сбросном канале БАЭС в разные периоды исследований как по численности, так и по биомассе доминировали *Daphnia galeata* Sars, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller), *Bosmina (Bosmina) longirostris*, *B. (Eubosmina) coregoni kessleri* (Uljanin), *Eudiaptomus graciloides*, *Mesocyclops leuckarti* (Claus) и ювенильные

3. Количественные и структурные показатели зоопланктона Копорской губы и Белоярского водохранилища в среднем за период исследований

Месяцы	Участки	Среднее количество видов в пробе				Численность (N), тыс. экз/м ³	Биомасса (B), г/м ³	Индекс Шеннона — Уивера, H _{Ni} , бит/экз	Индекс Шеннона — Уивера, H _B , бит/г	Коэффициент трофности, E	Индекс сапробности, S
		Rotifera	Сорерода	Сладосера	Сумма						
Копорская губа											
IV	A	1,7 ± 0,4	1,0 ± 0,2	1,1 ± 0,1	3,9 ± 0,5	4,314 ± 0,872	0,074 ± 0,019	1,3 ± 0,3	1,2 ± 0,2	1,0 ± 0,3	1,0 ± 0,0
	B	1,3 ± 0,3	1,5 ± 0,6	1,0 ± 0,0	3,8 ± 0,6	5,392 ± 4,742	0,023 ± 0,015	1,3 ± 0,3	1,6 ± 0,3	0,6 ± 0,2	1,4 ± 0,1
V	A	3,1 ± 0,3	0,9 ± 0,2	2,1 ± 0,2	6,1 ± 0,4	8,546 ± 1,889	0,111 ± 0,022*	2,0 ± 0,1	1,3 ± 0,1	2,3 ± 0,6	1,5 ± 0,0
	B	4,7 ± 1,3	0,7 ± 0,3	1,7 ± 0,3	7,0 ± 1,2	6,067 ± 3,399	0,051 ± 0,013	2,2 ± 0,2	1,3 ± 0,5	6,2 ± 3,3	1,4 ± 0,1
VI	A	3,2 ± 0,3	1,7 ± 0,4	2,6 ± 0,3*	7,5 ± 0,9	33,172 ± 11,558	0,444 ± 0,182	1,8 ± 0,2	1,9 ± 0,2	1,4 ± 0,3	1,5 ± 0,0
	B	2,8 ± 0,4	1,0 ± 0,0	1,6 ± 0,2	5,4 ± 0,5	10,311 ± 3,160	0,288 ± 0,130	1,8 ± 0,2	1,2 ± 0,4	1,6 ± 0,4	1,5 ± 0,1
VII	A	3,4 ± 0,4	2,2 ± 0,4	3,4 ± 0,4	9,1 ± 0,9	139,485 ± 55,042	1,559 ± 0,304*	1,8 ± 0,2	1,4 ± 0,2	1,6 ± 0,3	1,5 ± 0,0
	B	3,5 ± 0,6	2,3 ± 0,7	2,8 ± 0,3	8,7 ± 1,0	32,891 ± 10,705	0,215 ± 0,059	1,7 ± 0,4	1,9 ± 0,3	2,0 ± 0,8	1,5 ± 0,1
VIII	A	4,9 ± 0,5	3,7 ± 0,3	3,8 ± 0,7	12,4 ± 1,3	65,884 ± 7,858*	0,560 ± 0,118	2,3 ± 0,2	2,5 ± 0,1	1,6 ± 0,2	1,5 ± 0,0
	B	4,2 ± 0,4	3,2 ± 0,8	2,8 ± 0,2	10,2 ± 0,6	23,905 ± 7,195	0,235 ± 0,125	2,2 ± 0,4	2,7 ± 0,1	1,5 ± 0,4	1,4 ± 0,1

Продолжение табл. 3

Месяцы	Участки	Среднее количество видов в пробе			Численность (N), тыс. экз/м ³	Биомасса (B), г/м ³	Индекс Шеннона — Уивера, H _N , бит/экз	Индекс Шеннона — Уивера, H _B , бит/г	Коэффициент трофности, E	Индекс сапробиости, S
		Rotifera	Soropoda	Cladocera						
IX	A	2,5 ± 0,2	2,9 ± 0,3*	3,3 ± 0,3*	44,130 ± 9,436*	0,368 ± 0,135	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,2	1,1 ± 0,2	1,6 ± 0,0
		2,7 ± 0,6	1,4 ± 0,4	1,9 ± 0,1	6,281 ± 2,269	0,088 ± 0,034	1,9 ± 0,1	1,5 ± 0,2	2,1 ± 0,5	1,6 ± 0,0
VI	A	2,3 ± 0,9	1,8 ± 0,5	5,3 ± 0,8*	21,320 ± 2,846	0,640 ± 0,385	1,9 ± 0,1*	1,9 ± 0,2*	1,3 ± 0,7	1,6 ± 0,01
		B**	3,0	2,0	9,0	20,153	1,741	2,7	1,2	1,1
VII	A	2,2 ± 0,5	2,5 ± 0,3	4,0 ± 0,4	23,959 ± 5,842*	0,547 ± 0,180	2,6 ± 0,1	2,0 ± 0,2	1,2 ± 0,3	1,7 ± 0,02*
		B	2,5 ± 1,5	2,5 ± 0,5	5,0 ± 2,0	255,266 ± 200,601	2,034 ± 1,698	1,7 ± 0,5	1,9 ± 0,4	0,7 ± 0,1
VIII	A	4,2 ± 0,6	2,6 ± 0,2*	5,3 ± 0,4*	56,383 ± 7,361	2,619 ± 0,652	2,6 ± 0,1	1,5 ± 0,2	1,7 ± 0,3	1,7 ± 0,02*
		B	2,5 ± 0,5	2,0 ± 0,0	4,0 ± 0,0	85,424 ± 67,816	17,524 ± 16,784	2,1 ± 0,2	0,9 ± 0,4	1,3 ± 0,04
IX	A	3,8 ± 0,4	3,7 ± 0,6	4,5 ± 0,4	42,702 ± 11,555	1,147 ± 0,411	2,3 ± 0,1*	2,0 ± 0,2	1,6 ± 0,3	1,5 ± 0,02
		B	4,5 ± 0,5	3,5 ± 1,5	4,5 ± 2,5	23,073 ± 1,193	1,376 ± 0,776	2,9 ± 0,2	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,6

Белярское водохранилище

Продолжение табл. 3

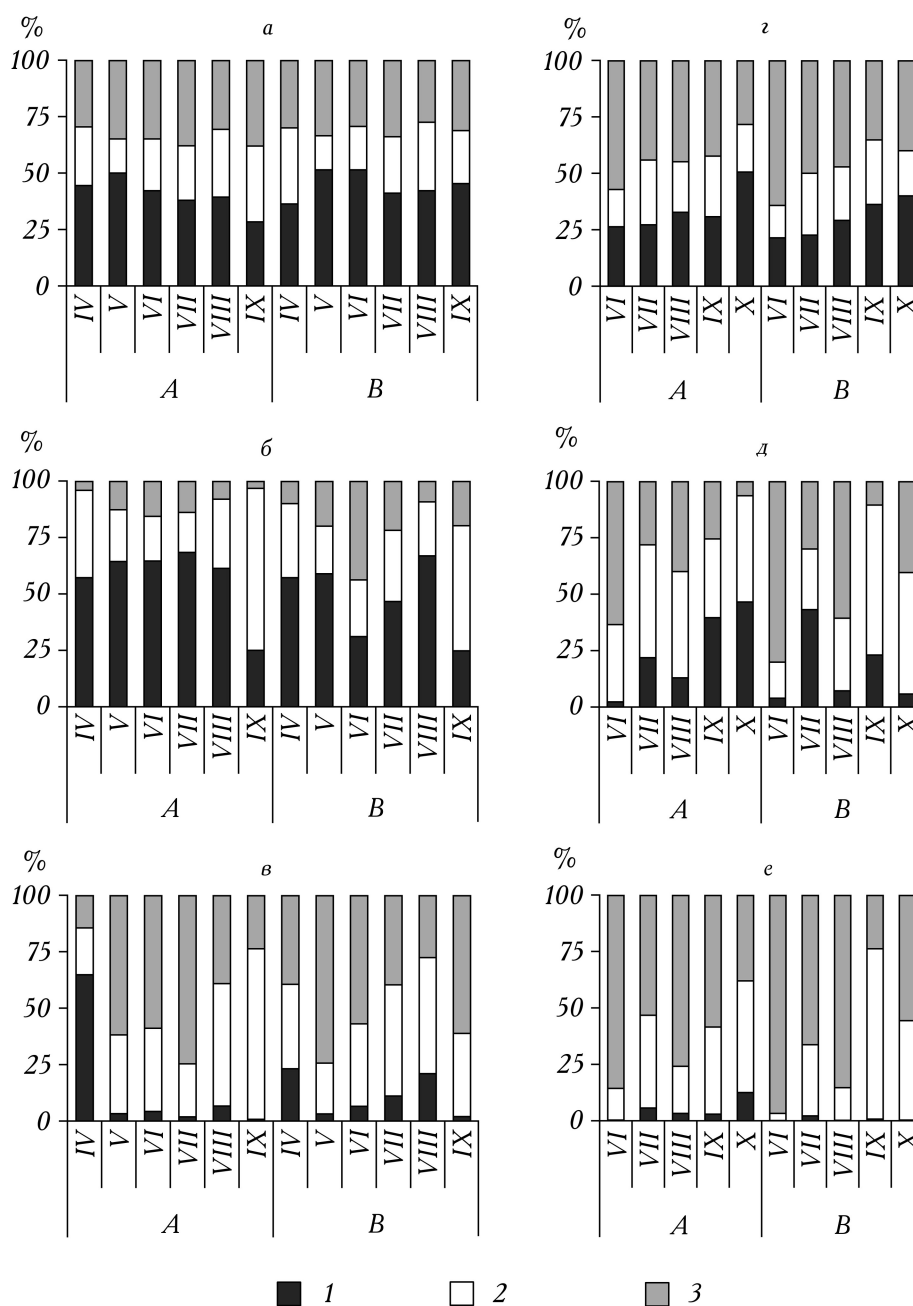
Месяцы	Участки	Среднее количество видов в пробе			Численность (N), тыс. экз/м ³	Биомасса (B), г/м ³	Индекс Шеннона — Уивера, H _N , бит/экз	Индекс Шеннона — Уивера, H _B , бит/г	Коэффициент трофичности, E	Индекс сапробиости, S
		Rotifera	Soropoda	Cladocera						
X	A	6,0 ± 1,2	2,3 ± 0,3	3,5 ± 0,9	17,598 ± 6,960	0,228 ± 0,159*	2,5 ± 0,3	2,7 ± 0,3*	3,4 ± 0,6	1,7 ± 0,1
	B**	4,0	2,0	4,0	32,440	1,516	2,3	1,6	2,7	1,6

* Достоверные различия ($p < 0,05$); ** ошибку среднего не подсчитывали из-за малой для статистической обработки выборки.

особи веслоногих ракообразных. Кроме того, среди доминирующих по численности видов зарегистрированы *Keratella quadrata* (O. F. Müller), *K. cochlearis* (Gosse), *Euchlanis dilatata* Ehrenberg; по биомассе также доминировали *Daphnia cristata* G. O. Sars, *D. cucullata* G. O. Sars, *Graptoleberis testudinaria* (Fischer), *Leptodora kindtii* (Focke), *Macrocyclus albidus*. Все виды, обнаруженные в сбросном канале БАЭС, встречались и в акватории водоема, не подверженной подогреву. Однако техногенное воздействие способствовало выпадению из гидробиоценоза таких видов, как *Acanthocyclops vireidis* (Jurine), *Cyclops strenuus* Fischer, *Eucyclops serrulatus* (Fischer), *Simocephalus vetulus* (O. F. Müller), *Polyphemus pediculus* (Linnaeus), встречавшихся на большинстве станций отбора проб в необогреваемой акватории водохранилища.

В сбросном канале БАЭС, по сравнению с акваторией, не подвергавшейся тепловому воздействию, численность планктонных животных возрастала в среднем в 2,6 раза, биомасса — в 4,7 раза (см. табл. 3, рис. 3). Увеличение численности коловраток происходило в среднем в 4,8 раза, биомассы — в 1,1 раза, численность ветвистоусых ракообразных возрастала в среднем в 2,4 раза, биомасса — в 5,4 раза, численность веслоногих ракообразных увеличивалась в среднем в 1,4 раза, биомасса — 2,3 раза. Зоопланктон, испытывающий влияние подогрева, достигал наибольшего развития в летний период, когда наблюдалось увеличение численности коловраток *Keratella quadrata* (до 81,4% общей численности сообщества в июле) и ветвистоусых ракообразных *Daphnia galeata* (до 62,5% общей численности в июле и до 92,1% от общей биомассы в августе).

В зоопланктоне необогреваемой акватории Белоярского водохранилища в летний период по количеству видов, численности и биомассе ракообразные преобладали над коловратками (см. рис. 4), при этом наибольшую долю составляли ветвистоусые ракообразные (в среднем 63,5% от общей численности и 85,7% от общей биомассы в июне). В осенний период наблюдалось увеличение количества видов и доли численности коловраток — в среднем до 50,5% от



4. Сезонная динамика соотношения таксономических групп зоопланктона в общем количестве видов (а, г), численности (б, д) и биомассе (в, е) в среднем по необогреваемой акватории (А) и сбросным каналам АЭС (В) в Копорской губе (а, б, в) и Белоярском водохранилище (г, д, е).

общего количества видов и до 46,5% от общей численности в октябре. В зоопланктоне сбросного канала доминировали ракообразные, за исключением июля, когда доля численности коловраток достигала в среднем 43,2%.

В Копорской губе Финского залива вне зоны подогрева значения индекса Шеннона — Уивера, рассчитанного по численности зоопланктона, в среднем составляли $1,8 \pm 0,1$ бит/экз., в сбросном канале ЛАЭС — $1,8 \pm 0,2$ бит/экз. Значения этого индекса, рассчитанного по биомассе, в необогреваемой акватории составляли $1,7 \pm 0,2$ бит/г, на водосбросе — $1,7 \pm 0,3$ бит/г. Сезонные изменения величин индекса Шеннона — Уивера в водах сбросных каналов ЛАЭС, по сравнению с акваторией водоема, не подвергавшейся тепловому воздействию, также были незначительны. По величине индекса сапробности воды Копорской губы и каналов ЛАЭС соответствовали олигосапробной — β -мезосапробной зоне (см. табл. 3).

В необогреваемой акватории Белоярского водохранилища средние значения индекса Шеннона — Уивера, рассчитанного по численности зоопланктона, составляли $2,3 \pm 0,1$ бит/экз., в сбросном канале БАЭС — $2,3 \pm 0,3$ бит/экз. Значения этого индекса, рассчитанного по биомассе, вне зоны подогрева составляли $1,9 \pm 0,1$ бит/г, на водосбросе — $1,4 \pm 0,2$ бит/г. Сброс подогретых вод БАЭС способствовал сокращению значений индекса Шеннона — Уивера, рассчитанного по биомассе зоопланктона. Значения этого индекса, рассчитанного по численности, в сбросном канале БАЭС, по сравнению с необогреваемой акваторией водоема, несущественно снижались в июле, августе и сентябре. Средние величины индекса сапробности в сбросном канале БАЭС и в акватории, не подвергающейся термическому воздействию, соответствовали β -мезосапробной зоне (см. табл. 3). По средним значениям коэффициента трофности воды Копорской губы и Белоярского водохранилища соответствовали эвтрофному типу (см. табл. 3).

Обсуждение результатов исследований

Исследованные водные объекты характеризовались умеренным подогревом (средняя температура на водосбросе в период исследований не превышала 27°C) [4]. Различия между водоемами по температурному воздействию были несущественны (в Копорской губе разница между температурой сбросной воды и необогреваемой акватории составляла в среднем $7,1^{\circ}$, в Белоярском водохранилище — $6,9^{\circ}$), что связано с техническими условиями эксплуатации АЭС. Однако гидрографические характеристики водоемов, а также состав и количественные показатели зоопланктона значительно отличались, вследствие чего различался и отклик планктонных беспозвоночных на воздействие АЭС.

Основу численности и биомассы зоопланктона в обоих водоемах составляли пелагические виды беспозвоночных с широким или всесветным распространением, эврибионты по отношению к факторам среды. Видовой состав зоопланктона необогреваемой акватории Копорской губы и Белоярского водохранилища существенно различался: из 95 видов, встречающихся в обоих водоемах, общим был только 31 вид, коэффициент Серенсена для обоих водоемов составлял 0,5. Из 53 видов беспозвоночных, встречающихся в сбросных каналах АЭС, общими для обоих водоемов были всего 11, а значение коэффициента Серенсена не превышало 0,3.

Результаты наших исследований и литературные данные [3, 10, 14—18] свидетельствуют о том, что на зоопланктон водоемов-охладителей влияет ряд факторов, среди которых определяющими являются тепловой и механический. Совокупное действие этих факторов способствовало тому, что в зоне влияния АЭС из сообщества выпадали организмы, наиболее подверженные техногенному воздействию, обладающие удлинённой формой тела, выступающими придатками и конечностями. В значительно меньшей степени воздействию сбросных вод АЭС подвергались беспозвоночные, имеющие мелкие размеры, твердые панцири, округлую форму и короткие конечности [5]. Эвритермные виды лучше переносили тепловое воздействие.

Влияние ЛАЭС и БАЭС на водоемы-охладители имело черты сходства, в обоих водных объектах наблюдалось сокращение видового богатства зоопланктона. Сброс теплых вод приводил к перестройкам в сообществах планктонных животных: в Копорской губе коэффициент Серенсена для необогреваемой акватории и сбросных каналов составлял 0,7, в Белоярском водохранилище — 0,6.

Различия в отклике планктонных животных на техногенное воздействие АЭС состояло в том, что в Копорской губе сброс подогретых вод ЛАЭС в большинстве случаев способствовал сокращению количественных показателей зоопланктона. При этом количество видов в пробе достоверно уменьшалось в сентябре, численность была достоверно ниже в августе и сентябре, а биомасса — достоверно сокращалась в мае и июле (см. табл. 3). В Белоярском водохранилище наблюдалась иная картина: сброс теплых вод БАЭС оказывал стимулирующее влияние на развитие планктонных беспозвоночных. В большинстве случаев наблюдалось увеличение количественных показателей сообщества, причем количество видов в пробе достоверно возрастало в июне и августе, численность была достоверно выше в июле, а биомасса — в октябре (см. табл. 3).

Заключение

На фоне общей высокой антропогенной нагрузки поступление в исследованные водоемы-охладители сбросных вод АЭС приводило к возникновению зоны интенсивного воздействия на гидробионтов. Размеры этой зоны относительно необогреваемой акватории были невелики, однако в зоопланктоне, испытывающем техногенное воздействие, наблюдалось уменьшение общего количества видов, массового развития достигали эврибионтные виды с широким или вседневным распространением.

В результате воздействия ЛАЭС на экосистему Копорской губы происходило уменьшение численности и биомассы зоопланктона в среднем в 3,5 раза. Сброс подогретых вод приводил к сокращению обилия коловраток *Keratella cochlearis baltica*, *K. quadrata platei*, науплиусов веслоногих ракообразных и ветвистоусых ракообразных *Bosmina (Eubosmina) coregoni maritima*, массово развивающихся в необогреваемой акватории Копорской губы. В Белоярском водохранилище в районе водосброса БАЭС наблюдалось увеличение численности зоопланктона в среднем в 2,6 раза, биомассы — в 4,7 раза. Особенно сильное стимулирующее воздействие на развитие беспозвоночных сброс теплых вод оказывал в середине

лета, когда подогрев способствовал увеличению обилия коловраток *Keratella quadrata* и ветвистоусых ракообразных *Daphnia galeata*.

**

Термічну дію на зоопланктон двох водойм-охолоджувачів атомних електростанцій вивчали протягом 5 років. Скидання підігрітих вод Ленінградської АЕС в Копорську бухту, що є частиною акваторії Фінської затоки, призводило до скорочення кількісних показників зоопланктону. Водночас, скидання підігрітої води у водойму-охолоджувач Білоярської АЕС сприяв збільшенню чисельності і біомаси планктонних безхребетних. В обох досліджених водоймах дія АЕС сприяла зменшенню загальної кількості видів зоопланктону. Основу чисельності і біомаси склали пелагічні види з широким або всесвітнім поширенням.

**

Thermal impact on zooplankton community of two original power plant (NPP) cooling ponds was studied over 5 years period. Heat discharge of Leningrad NPP into Koperskaya Bay, being an open water object and a part of Gulf of Finland, leads to decrease of zooplankton community structural characteristics. On the over hand, heat discharge into Beloyarsk water storage (Beloyarsk NPP) follows increasing of zooplankton diversity and biomass. Commonly, power plant operation consequences are biodiversity decrease and diversity indexes reduction, zooplankton community structure simplification. The basis of zooplankton diversity and biomass was made by pelagic species with wide distribution.

**

1. Безносков В.Н., Кучкина М.А., Сузгалева А.Л. Исследование процесса термического эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Вод. ресурсы. — 2002. — Т. 29, № 5. — С. 610—615.
2. География и мониторинг биоразнообразия. — М.: Изд-во Науч. и уч.-метод. центра, 2002. — 432 с.
3. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины / Отв. ред. М. Ф. Поливанная. — Киев: Наук. думка, 1991. — 191 с.
4. Животова Е.Н. Использование зоопланктона в биоиндикации теплового загрязнения водоемов-охладителей АЭС // Вестник ВГУ, Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2007. — № 1. — С. 73—75.
5. Карташева Н.В., Фомин Д.В., Попов А.В. и др. Оценка техногенного воздействия на зоопланктон водоемов-охладителей атомных и тепловых электростанций // Вестн. Моск. ун-та. Серия. 16. Биология. — 2008. — № 3. — С. 30—35.
6. Кулаков Д.В., Макушенко М.Е., Верещагина Е.А. Зоопланктон и зообентос Белоярского водохранилища в условиях теплового воздействия атомной электростанции // Водное хозяйство России. — 2016. — № 5. — С. 90—101.
7. Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР. — Л.: Наука, 1970. — 744 с.
8. Макушенко М.Е., Кулаков Д.В., Верещагина Е.А. Зоопланктон Копорской губы Финского залива в зоне воздействия Ленинградской АЭС // Гидробиол. журн. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 3—15.

9. *Методика* изучения биогеоценозов внутренних водоемов. — М.: Наука, 1975. — 240 с.
10. *Митрахович П.А., Самойленко В.М., Карташевич З.К. и др.* Экосистема водоема-охладителя Лукомской ГРЭС. — Минск: Белорус. гос. ун-т, 2008. — 192 с.
11. *Мордухай-Болтовской Ф.Д.* Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов // Тр. Ин-та биологии внутренних вод АН СССР. — 1975. — Т. 30, № 27. — С. 7—69.
12. *Мязметс А.Х.* Изменения зоопланктона // Антропогенное воздействие на малые озера. — Л.: Наука. — 1980. — С. 54—64.
13. *Определитель* зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. — М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2010. — 495 с.
14. *Протасов А.А.* Состав и распределение зоопланктона водоема-охладителя Хмельницкой АЭС // Гидробиол. журн. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 35—44.
15. *Ривьер И.К.* Зоопланктон Иваньковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Конаковской ГРЭС // Экология организмов водохранилищ-охладителей. — Л.: Наука. — 1975. — С. 220—243.
16. *Barnett P.R.O.* Effect of warm water effluents from power stations on marine life // Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. — 1972. — Vol. 180, N 1061. — P. 497—509.
17. *De Nie H.W.* Effects of thermal effluents from the Bergum Power Station on the zooplankton in the Bergumermeer // Hydrobiologia. — 1982. — Vol. 95, N 1. — P. 337—349.
18. *Heinle D.R.* Effect of passage through power plant cooling system on estuarine copepods // Environ. Pollut. — 1976. — Vol. 11, N 1. — P. 39—58.
19. *Shannon C.E., Weaver W.* The mathematical theory of communication. — Urbana: University of Illinois Press, 1963. — 117 p.
20. *Sladeček V.* System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol. — 1973. — Vol. 7. — P. 1—218.

¹ Институт геоэкологии РАН,
Санкт-Петербург, РФ

² Санкт-Петербургский
государственный университет, РФ

Поступила 26.06.17