

ЭКОЛОГИЯ СООБЩЕСТВ ДОННЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СИБИРИ

© 2011 г. Л. В. Яныгина

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения

Российской академии наук

656038 Барнаул, ул. Молодежная, 1

Поступила в редакцию 24.06.2010 г.

На основе анализа литературных данных и собственных исследований автора приведена характеристика донных зооценозов водоемов-охладителей восьми тепловых электростанций Сибири. В изученных водоемах отмечено высокое доминирование отдельных видов в профундали, максимальное таксономическое разнообразие в прибрежной зоне, высокая значимость типа грунтов как фактора пространственного распределения бентосных беспозвоночных. По этим параметрам, а также по составу комплекса доминирующих видов и особенностям многолетних колебаний биомассы зообентоса исследованные водоемы-охладители Сибири схожи не только с подогреваемыми водоемами других регионов, но и с водохранилищами в целом.

Ключевые слова: макрозообентос, водоемы-охладители, Сибирь.

Большая часть электроэнергии в мире вырабатывается на тепловых и атомных электростанциях, работа которых связана с поступлением основной части получаемой тепловой энергии с подогретыми сбросными водами в водоем-охладитель. Постоянный приток дополнительного тепла в водоем вызывает изменение одного из наиболее значимых экологических факторов — температуры воды T_w , что влияет не только на гидрологический и гидрохимический, но и на гидробиологический режим водоемов [9]. К настоящему времени известны сведения по некоторым аспектам жизни водоемов-охладителей и результаты многолетних комплексных исследований отдельных водоемов [9, 18, 33]. Несмотря на понимание важности ландшафтно-географического подхода при изучении влияния нагрева вод на динамику водных экосистем, работы, обобщающие результаты гидробиологических исследований ряда водоемов-охладителей различных природных зон, сравнительно редки [12, 19, 28].

Цель работы — обобщение результатов исследований зообентоса водоемов-охладителей тепловых электростанций Сибири.

В работе использованы материалы исследований автором зообентоса и зооперифитона водоема-охладителя Беловской ГРЭС [37], а также результаты исследований водоемов-охладителей Барабинской [11], Харанорской [10], Гусиноозерской [34], Березовской [2], Назаровской [4] ГРЭС и Читинской [33] ТЭС. В обзор также включены данные по гидробиологии водоема-охладителя Экибастузской

ГРЭС [23], расположенного в Северном Казахстане, но территориально близкого к водоемам юга Западной Сибири.

Сбор и обработку проб в исследованных водоемах-охладителях проводили стандартными гидробиологическими методами, что дает возможность сравнивать полученные результаты.

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ ЗООЦЕНОЗОВ ВОДОЕМОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Фауна водоемов-охладителей формируется преимущественно за счет видов, обитавших в водоеме до образования водохранилища или поступивших в него при его заполнении водой из других водоемов. По способу образования исследованные водоемы-охладители можно разделить на наливные, озерные и речные [19].

К наливным водоемам относятся Барабинские пруды и Харанорское водохранилище. Наливные водоемы самые мелководные (максимальная глубина Барабинских водоемов-охладителей — 3, Харанорского — 5.8 м) (табл. 1). Для наливных водохранилищ характерно низкое таксономическое разнообразие зообентоса, что было показано ранее на примере водоемов-охладителей Украины [28]. Минимальное таксономическое богатство среди водоемов-охладителей Сибири (47 видов) также отмечено в наливных водоемах — Барабинских прудах [11]. Бедность донных сообществ наливных водоемов на начальных этапах их формирования может быть

Таблица 1. Характеристика некоторых факторов формирования зооценозов водоемов-охладителей ГЭС и ТЭЦ (здесь и в табл. 2–4 прочерк — отсутствие данных)

ГЭС и ТЭЦ	Год создания	Площадь (НПУ), км ²	Испарение, % объема	Глубина, м		Размер зоны подогрева, % площади	Преобладающие грунты, % площади			Дополнительная нагрузка	Источник
				средняя	максимальная		ил	заросли	песок		
Экибастузская	1979	20.0	45.0	4.6	8.5	40	—	15	—	Рыбоводство, в том числе садковое	[23]
Читинская (оз. Кенон)	1965	16.0	22.6	4.4	6.8	10	—	44	прибрежье	Рыбоводство, рекреация	[33]
Гусиноозерская	1979	164.0	5.6	15	25.0	2	60	26	12	Рыбоводство, сточные воды, питьевое водоснабжение	[34]
Барабинская	1953	2.0	—	2.0	3.0	50*	75	10–15	—	—	[11]
Березовская	1986	33.4	—	5.8	15.0	—	—	—	—	Сточные воды	[2]
Беловская	1964	13.6	16.4	4.0	12.0	40	—	—	—	Рыбоводство, в том числе садковое рекреация	[37]
Харанорская	1995	4.1	44.0	3.8	—	—	—	<1	—	Рекреация, рыболовство	[10]

* — по площади поймы.

связана с отсутствием аборигенной фауны; изначально эти водоемы заселяют животные, случайно попавшие с водой, поступившей из естественных водоемов. Сравнительно высокое разнообразие гидробионтов Харанорского водохранилища, вероятно, связано с затоплением пойменных водоемов р. Онон.

Водоемы-охладители речного происхождения делятся на две группы: водохранилища, образованные при полном (Беловское и Березовское) или частичном (Назаровская ГРЭС) зарегулировании стока рек. Речные водохранилища отличаются вытянутой вдоль русла зарегулированной реки формой и сравнительно высокой проточностью. Фауна таких водоемов в период заполнения формируется за счет реофильных видов, которые затем вытесняются лимнофилами; однако в верхней части водоема донное сообщество может пополняться речными гидробионтами.

К водоемам-охладителям озерного происхождения относятся озера Гусиное (Гусиноезерская ГРЭС), Кенон (Читинская ТЭЦ), Желгельды (Экибастузская ГРЭС). В какой-то степени сюда можно отнести и Харанорское водохранилище, созданное на месте пойменных водоемов р. Онон.

Согласно классификации водохранилищ по площади водного зеркала и глубине [1] большинство рассмотренных водоемов-охладителей (Экибастузской, Харанорской, Беловской ГРЭС и Читинской ТЭЦ) относятся к группе небольших и неглубоких. Водохранилище Березовской ГРЭС – средних размеров и неглубокое, Гусиноезерской ГРЭС – крупное средней глубины, Барабинской ГРЭС – малое мелководное (табл. 1).

Изменения в экосистемах водоемов-охладителей в значительной степени зависят не только от системы водоснабжения ТЭС, параметров охладителя и тепловой нагрузки на него, но и от структуры экосистемы, определяемой ландшафтно-географической зоной, в которой расположен водоем-охладитель [9], а также от климатических условий региона. Все названные водохранилища находятся в умеренных широтах (50° – 55° с.ш.), однако физико-географические условия формирования экосистем отдельных водоемов значительно различаются. Водоем-охладитель Экибастузской ГРЭС находится в степной зоне [23]. Водоемы-охладители Беловской, Назаровской и Березовской ГРЭС расположены в лесостепной зоне [2, 4]. Особую группу образуют водоемы-охладители межгорных котловин Забайкалья: озера Кенон и Гусиное.

На структурно-функциональные характеристики сообществ донных беспозвоночных в водоемах-охладителях действует ряд абиотических факторов, основные из которых – тип субстрата, гидрохимический режим водоема, температура [22, 24].

Тип субстрата

В большинстве исследованных водохранилищ можно выделить пять основных типов биотопов: илы, пески, камни, бетонные плиты и заросли высшей водной растительности. Илы – самый распространенный во всех водохранилищах субстрат; они обычно приурочены к глубоководной зоне и занимают до 75% площади дна водохранилища. Сообщества бентосных беспозвоночных илов отличаются невысоким таксономическим разнообразием, сравнительно высокими численностью и биомассой зообентоса, доминированием 2–3 видов животных преимущественно из сем. Chironomidae и сем. Tubificidae (табл. 2), однородным пространственным распределением организмов, связанным, в первую очередь, с относительным постоянством среды обитания.

Пески встречаются преимущественно в прибрежье водохранилищ и занимают незначительную площадь дна водоемов, наиболее распространены песчаные субстраты в водоемах-охладителях озерного происхождения (озера Кенон и Гусиное) (табл. 1). Бентосные сообщества песков водоемов-охладителей, как и других водных объектов, характеризуются невысоким таксономическим разнообразием и низкими значениями численности и биомассы животных; доминируют преимущественно формы, обитающие на поверхности субстрата. Так, в оз. Гусином биомасса зообентоса чистых песков (2.3 г/м^2) была на порядок ниже, чем в других биотопах [34].

Каменистые субстраты слабо распространены в водоемах-охладителях, обычно они представлены искусственно внесенным в берегоукрепительных целях щебнем и как правило встречаются в литорали приплотинного и водоподводящего участков; в литорали водоемов-охладителей озерного происхождения встречается также галечник. Донные зооценозы каменистых субстратов таксономически разнообразны (уступают только зарослям макрофитов), однако для них характерно неравномерное пространственное распределение беспозвоночных, что связано с нестабильностью условий обитания в прибрежье. Так, в сентябре 2002 г. в Беловском водохранилище прибрежные участки с каменистыми субстратами были наименее схожи между собой, а амплитуда колебаний биомассы зообентоса была максимальной (1.8 – 38.0 г/м^2).

Бетонными плитами обычно выложены берега каналов; они занимают незначительную часть водохранилищ. Бетонные плиты, как правило, слабо заселены беспозвоночными.

Заросли высшей водной растительности по распространенности в большинстве водохранилищ находятся на втором (после илов) месте и в различных водохранилищах занимают от 15 до 45% площади акватории. Незначительная площадь зарастания отмечается обычно только на начальных этапах

Таблица 2. Доминирующие таксоны и количественные показатели зообентоса и зооперифитона водоемов-охладителей ГРЭС и ТЭЦ Сибири (здесь и в табл. 4 *N* – средняя численность, тыс. экз/м²; *B* – средняя биомасса, г/м²)

ГРЭС и ТЭЦ	Год создания	Число видов	<i>N</i>	<i>B</i>	Доминанты			Источник
					ил	заросли	камни, песок	
Экибастузская	1990–1991	85	–	12–15	<i>p. Chironomus</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> , <i>p. Polypedilum</i> , <i>p. Procladius</i>	<i>p. Glyptotendipes</i> , <i>p. Endochironomus</i> , <i>p. Cricotopus</i>	–	[23]
Читинская (оз. Кенон)	1985–1986	116	11–13	35–56	<i>Chironomus plumosus</i> , <i>Procladius ferrugineus</i> , <i>Sphaerium corneum</i> , <i>Pisidium inflatum</i> , <i>Tubifex tubifex</i>	<i>Gammarus lacustris</i> , отгр. Ephemeroptera	–	[33]
Гусиноозерская	1990–1991	>32*	–	26–54	<i>Chironomus anthracinus</i> , <i>Limnodrilus udekemianus</i> , <i>T. tubifex</i>	<i>Gmelinoidea fasciatus</i> , <i>Gammarus lacustris</i>	<i>Micrurus wohlii</i> , <i>Gmelinoidea fasciatus</i>	[34]
Барабинская	1975 1977	47 –	– –	14–29 30–60	<i>Chironomus plumosus</i> , <i>Procladius choreus</i> , <i>P. convictum</i>	<i>Cricotopus sylvestris</i> , <i>Glyptotendipes glaucus</i>	<i>Lymnaea stagnalis</i>	[11]
Березовская	2003	65	2	4	<i>T. tubifex</i> , <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> , <i>Chironomus plumosus</i>	<i>Cricotopus sylvestris</i> , <i>Glyptotendipes glaucus</i>	–	[2]
Беловская	2002	137	6	12	<i>Chironomus gr. plumosus</i> , <i>p. Limnodrilus</i>	<i>Glyptotendipes glaucus</i> , <i>Gmelinoidea fasciatus</i> , <i>p. Lymnaea</i>	<i>p. Lymnaea</i> , <i>Gmelinoidea fasciatus</i>	[37]
Харанорская	1978–1980	66	–	6	–	–	–	[10]
Назаровская	1995–2003	77	1.6	4.9	–	–	<i>p. Hydropsyche</i> , <i>p. Ephemera</i> , отгр. Diptera	[4]

* – до вида определены только хирономиды, пиявки и гаммариды.

формирования водохранилищ: через 5 лет после заполнения в Харанорском водохранилище отмечали лишь небольшие по площади заросшие участки в водоподводящем, сбросном и дренажном каналах [10]. Для зооценозов зарослей макрофитов характерно максимальное таксономическое разнообразие и высокое обилие беспозвоночных, но эти сообщества недолговременны: в конце лета происходит отмирание высших водной растительности и, соответственно, разрушение фитофильного сообщества. Так, в водоеме-охладителе Экибастузской ГРЭС в результате отмирания мягкой растительности в августе 1990 г. биомасса обитающих в зарослях беспозвоночных снизилась в 10 раз [23].

Таким образом, из всех рассмотренных типов субстратов наиболее благоприятны для беспозвоночных заросли высшей водной растительности, ниже разнообразие и обилие донных животных на илах, наименее заселены бетонные плиты.

Влияние гидрохимического режима водоемов-охладителей на зообентос

Поступление в водоем-охладитель подогретой воды приводит к изменениям гидрохимического режима водохранилища. Увеличение T_w воды влияет в первую очередь на содержание в ней O_2 , причем в зависимости от мощности ГРЭС, морфологических особенностей водохранилища, времени года кислородный режим может как улучшаться, так и ухудшаться. К факторам, улучшающим кислородный режим в результате подогрева, можно отнести активизацию перемешивания воды, наличие неполного ледового покрова, увеличение интенсивности фотосинтеза; к ухудшающим — снижение растворимости O_2 , увеличение концентрации растворенной углекислоты, интенсификацию распада органических соединений и дыхания гидробионтов, сопровождающихся потреблением O_2 [7].

В большинстве водоемов-охладителей Сибири кислородный режим благоприятен как на подогреваемых, так и на непотраиваемых участках (табл. 3). Снижение содержания растворенного O_2 до критических для беспозвоночных значений (до 1.2 мг/л) отмечено в водоеме-охладителе Березовской ГРЭС, что связано с потреблением O_2 на разложение затопленного торфа [27]. Сравнительно невысокие значения биомассы зообентоса в этом водохранилище, возможно, связаны с неблагоприятным кислородным режимом.

В результате подогрева обычно увеличивается содержание биогенных веществ (БВ), что способствует повышению трофности водоема и существенно изменяет условия обитания беспозвоночных [7]. В исследованных водоемах-охладителях не отмечено существенной разницы в содержании органических веществ (ОВ) и БВ между подогреваемой и непотраиваемой зонами. Однако в оз. Гуси-

ном, единственном из водоемов-охладителей Сибири с длительным рядом гидрохимических наблюдений до строительства ГРЭС, через 12 лет после начала эксплуатации станции отмечено увеличение концентрации NO_3^- на порядок, а ХПК — в три раза по сравнению с периодом до использования озера в качестве водоема-охладителя [34]. Возможно, увеличение количества ОВ и БВ — одна из причин роста продуктивности донных зооценозов: средняя биомасса зообентоса в оз. Гусином повысилась за этот же период почти в 9 раз (табл. 4). Следует также отметить, что рост концентрации ОВ и БВ может быть связан не только с повышением T_w , но и с увеличением их поступления с водосборного бассейна, ростом рекреационной нагрузки на водоем, сбросом недостаточно очищенных сточных вод.

Повышение T_w водоемов-охладителей приводит также к увеличению испарения с поверхности и как следствие — росту общей минерализации воды [7]. Объем испаряемой воды зависит от морфометрии водоема-охладителя и ландшафтно-географической зоны, в котором он расположен. Максимальные водопотери за счет испарения (~45% объема водохранилища в год) отмечены в водохранилищах степной зоны Экибастузской и Харанорской ГРЭС [10, 23]. Увеличение средней минерализации (до 663 мг/л в водоеме-охладителе Экибастузской ГРЭС) может быть связано не только с активным испарением, но и с переносом минеральных частиц ветром и с их взмучиванием со дна [23].

Поступление сточных вод с золоотвалов обусловило существенное увеличение содержания сульфатов в воде озер Кенон и Гусино (в 11 и 2.5 раза соответственно) по сравнению с периодом до начала работы ГРЭС [33, 34]. Это приводит к увеличению количества сульфидов в грунте, особенно значительному в отепленной зоне (в оз. Кенон — 945–978 мг/(л ила) по сравнению с 156–326 мг/(л ила) в зоне с естественным режимом T_w). На примере оз. Кенон показано, что повышение T_w в зоне влияния сбросных вод приводит к увеличению численности образующих сероводород бактерий, что способствует выделению сероводорода в придонные слои воды и является неблагоприятным фактором для развития макробеспозвоночных [33]. В некоторых водоемах-охладителях отмечен незначительный рост рН в отепленной зоне [2, 23, 34]. Однако колебания значений рН, так же как и изменения общей минерализации, не выходили за пределы оптимальных для пресноводных беспозвоночных значений.

Температура воды

Постоянный приток дополнительного тепла в водоемы вызывает изменение одного из наиболее значимых экологических факторов — T_w , что суще-

Таблица 3. Гидрохимическая характеристика различных температурных зон водоемов-охладителей ГРЭС и ТЭЦ Сибири

ГРЭС и ТЭЦ	Показатель	До создания водоема-охладителя	Температурный режим		Источник
			естественный	подогрев	
Экибастузская	ХПК, мг О/л	—	26.2**	39.1*	[23]
	$N_{\text{общ}}$	—	0.138–0.645**	0.163–0.422*	
	Минерализация, мг/л	—	151–198**	370–663*	
	pH	—	7.3–8.2**	7.5–8.3*	
Читинская (оз. Кенон)	ХПК, мг О/л	—	—	30–45*	[33]
	Минерализация, мг/л	539–598	—	552–642*	
	SO_4^{2-} , мг/л	25	—	275	
	pH	—	—	8.2–8.6*	
Гусиноозерская	ХПК, мг О/л	5.1–20.3	—	10.5–51.7*	[34]
	NO_3^- , мг/л	0.01–0.03	0.33	0.36	
	Минерализация, мг/л	175–280	—	232–338*	
	SO_4^{2-} , мг/л	8.2–22.1	—	18–53*	
	pH	8.0	—	8.1	
	O_2 , мг/л	—	8.9	9.3	
Беловская	ХПК, мг О/л	—	17.3–21.7**	20.2–25.0*	[17]
	NO_3^- , мг/л	—	0.72–1.06**	0.61–1.11*	
	SO_4^{2-} , мг/л	—	12.6–19.6**	17.2–22.4*	
	O_2 , мг/л	—	9.1–12.3**	9.4–12.0*	
Березовская	ХПК, мг О/л	54.6	—	16.0–45.0*	[2, 27]
	pH	7.5–8.5	—	7.0–8.8	
	O_2 , мг/л	—	—	1.2–7.2	
Харанорская	ХПК, мг О/л	—	25.4	23.6	[10]
	NO_3^- , мг/л	—	—	0.01–0.07*	
	Минерализация, мг/л	—	95–360**	162–242	
	pH	—	8.0–9.2	8.1–9.0	
	O_2 , мг/л	—	—	4.5–9.9*	

* — в среднем по водохранилищу;

** — для поступающих вод.

ственно влияет на гидробиологический режим водоемов. Превышение T_w подогреваемой зоны естественных для данного региона значений максимально зимой (может достигать 10–12°C), минимальны эти различия летом. Во всех водоемах-охладителях можно выделить зоны сильного (у устья сбросного канала), умеренного и слабого подогрева; во многих водоемах-охладителях существует и зона с естественным режимом T_w . Размеры зон влияния циркуляционного потока охлаждающей воды во многом зависят от технических характеристик ГРЭС (в том числе числа работающих энергоблоков). В большинстве водохранилищ подогреваемая

зона составляет 10–40% площади всего водоема, максимальны эти значения в водоеме-охладителе Барабинской ГРЭС, минимальны — в оз. Гусином (табл. 1). У поверхности ДО и в придонном слое воды изменения T_w менее выражены, чем в поверхностном слое воды.

Зимой подогрев воды — благоприятный фактор для развития бентосных сообществ различных географических зон. В водоемах-охладителях умеренных широт, в отличие от южных, искусственное повышение T_w стимулирует развитие донных сообществ и летом: в большинстве исследованных водоемов отмечено увеличение численности и био-

Таблица 4. Численность N , биомасса B , число видов S и видовое разнообразие по индексу Шеннона H , бит/экз., зообентоса различных температурных зон водоемов-охладителей ГРЭС и ТЭС Сибири

ГРЭС и ТЭС	Показатель	До создания водоема-охладителя	Температурный режим		Источник
			естественный	подогрев	
Читинская (оз. Кенон)	N	1.1	11.1	13.2	[21]
	B	10.8	45.6	41.9	
	S	—	54	58	
	H	—	3.0	3.0	
Гусиноозерская	N	—	12.1	13.6	[34]
	B	6.4	54.2	56.1	
Березовская	N	4.5	—	3.7	[2]
	B	7.7	—	6.1	
	S	—	20	23	
	H	—	—	3.2	
Беловская	N	—	8.4	8.1	[37]
	B	—	6.7	17.8	
	H	—	1.7	1.4	
Харанорская	N	—	7.0	4.6	[10]
	B	—	3.6	9.79	
	S	—	5–8		
Назаровская	N	—	0.7	1.6	[4]
	B	—	2.3	4.9	
	S	—	56	77	

массы зообентоса в результате подогрева; в некоторых водоемах (охладители Березовской, Назаровской ГРЭС и оз. Кенон) увеличивается и таксономическое разнообразие [2, 4, 33].

Увеличение количества зообентоса в подогреваемой зоне по сравнению с таковым участков с естественным режимом T_w характерно не только для южносибирских, но и для заполярных водохранилищ. Так, в оз. Имандра максимальные количественные показатели зообентоса отмечены в сбросном канале и зоне максимального подогрева; дополнительное поступление тепла привело к увеличению продолжительности вегетационного сезона, более раннему созреванию олигохет и вылету хирономид и, соответственно, повышению продукции зообентоса [22]. Связано это, прежде всего, со сравнительно низкой естественной T_w сибирских водоемов: даже при сильном подогреве T_w обычно не превышает максимум для гидробионтов (который и для Сибири, и для Европы составляет 30°C [15]).

В водоемах-охладителях Украины даже при умеренном подогреве весной и в первой половине лета количественное развитие зообентоса увеличивалось, во второй половине лета и осенью его развитие угнеталось, в результате осенний подъем развития донной фауны был смещен на зимний период [20]. Возможно, это связано с летним подъемом T_w до 37–39°C, что и приводит сначала к угнетению, а затем к гибели донных беспозвоночных [28]. Угне-

тение донной фауны летом отмечено и при исследовании водоема-охладителя Молдавской ГРЭС [8].

Одна из причин повышения продуктивности бентосных зооценозов — возможность размножения холодноводных видов зимой в отепленной зоне. Так, при исследовании зообентоса Беловского водохранилища показано, что *Gmelinoides fasciatus* Steb., доминировавший летом в литорали слабо- и непогреваемых участков и не встречавшийся в зоне сильного подогрева, ранней весной (в апреле) достигал максимальных значений по численности и биомассе в зоне сильного подогрева. Причем в зообентосе участков с естественным режимом по T_w в апреле встречались лишь крупные самцы и самки без яиц перезимовавшей генерации. В зоне максимального подогрева в апреле 2002 г. (при температуре воды 11.0–14.5°C) были обнаружены самки с яйцами и единичные экземпляры молоди *G. fasciatus*, что может косвенно свидетельствовать о начале размножения гаммарид в сбросном канале водохранилища в марте. Активное размножение *G. fasciatus* в слабо- и непогреваемых зонах водохранилища началось лишь в июне.

Другой причиной повышения продуктивности зообентоса водоемов-охладителей служит увеличение количества генераций отдельных видов. Так, в прудах-охладителях Барабинской ГРЭС отмечено три генерации *Chironomus plumosus* (L.), в то время как в оз. Убинском, также расположенном в Бара-

бинской степи, выделено две генерации этого вида [10]. На подогреваемом участке оз. Кенон также отмечено на одну генерацию *Ch. plumosus* больше, чем на участке с естественным режимом по T_w [33].

Существенное влияние на повышение биомассы сообществ бентосных беспозвоночных оказывает удлинение вегетационного сезона в результате подогрева. Так, в прудах-охладителях Барабинской ГРЭС весеннее прогревание воды начинается примерно на месяц раньше, чем в других водоемах той же зоны, а осенний спад T_w происходит в одни и те же сроки, что приводит к удлинению вегетационного сезона на один месяц по сравнению с водоемами с естественным режимом по T_w [11]. В зоне максимального подогрева большинства водохранилищ T_w и зимой не опускается ниже 5°C и рост некоторых видов беспозвоночных продолжается в течение всего года. Например, в оз. Кенон отмечен зимний рост личинок *Procladius ferrugineus* Kieff., при этом сумма эффективных T_w в термальной зоне озера на 176 градусо-дней была больше, чем в непогреваемой зоне [33].

Таким образом, повышение биомассы донных сообществ в результате подогрева обусловлено следующими факторами: удлинением вегетационного сезона, размножением холодноводных видов в подогреваемой зоне зимой, ускорением темпов роста, увеличением количества генераций, отсутствием заморов из-за неполного ледового покрова.

При оценке влияния подогрева на бентосное сообщество обычно проводится сравнение подогреваемой зоны с непогреваемым участком этого же водоема, при этом следует учесть, что продуктивность даже непогреваемых участков также косвенно может увеличиваться при наличии в водоеме подогрева. Во-первых, некоторые виды зообентоса (например, амфиподы) способны к миграциям в течение года в зону с наиболее благоприятным режимом по T_w (летом — в непогреваемую, зимой — в подогреваемую). Во-вторых, имаго эвритермных амфибиотических насекомых, вылетевшие из подогреваемого участка водоема (где отмечается большее количество генераций), могут делать яйцекладки в непогреваемой зоне, увеличивая этим ее продуктивность. Соответственно, сравнивать корректнее состояния сообществ одного и того же водоема до и после строительства ГРЭС, что оказалось возможным только для водоема-охладителя Гусинозерской ГРЭС (остальные водоемы были созданы специально для ГРЭС или не имели длительного ряда наблюдений в доэксплуатационный период).

При исследованиях зообентоса водоемов-охладителей Беловской, Гусинозерской, Березовской и Экибастузской ГРЭС было отмечено, что наиболее значимый фактор пространственного распределения бентосных беспозвоночных в водохранилищах — тип грунтов; T_w имеет второстепенное значение [2, 23, 34]. Решающее значение ка-

чества субстрата по сравнению с режимом по T_w показано также при исследовании зообентоса водоема-охладителя Литовской ГРЭС [13]. Возможно, приоритет эдафического фактора над T_w фактором — общая тенденция пространственного распределения зообентоса, однако в большинстве проанализированных работ значение типа субстрата в распределении гидробионтов авторы не учитывали (сравнивали только сообщества различных T_w зон). Также следует иметь в виду, что наряду с эвритермными видами, обеспечивающими высокое таксономическое сходство однотипных грунтов подогреваемых и непогреваемых зон водохранилищ, в отепленной зоне водоемов могут существовать стенобионтные теплолюбивые виды, формирующие своеобразное сообщество отепленных участков. Процент таких видов в водоемах-охладителях Сибири невелик и их появление, как правило, связано с инвазиями.

Инвазии

Еще на ранних этапах изучения экосистем водоемов-охладителей анализ режима по T_w позволил высказать предположение о возможности заселения их термофильными или даже тропическими видами [26]. Однако находки таких видов сравнительно редки; связано это не только с пространственной удаленностью от естественных местообитаний данных видов, но и с различиями в качестве биотопов. Обитание тропических видов моллюсков отмечено во многих водохранилищах Европы. Так, в водоемах-охладителях Курской АЭС и Молдавской ТЭС обнаружен *Physella integra* (Haldeman), в водохранилище Курской АЭС обитает *Planorbis corneus* var. *tubra* [5, 8]. Во всех случаях тропические виды-вселенцы обитали в подогреваемых зонах водохранилищ; наиболее вероятный их источник (донор) — аквариумное рыбоводство. В условиях Сибири существование таких видов возможно только в сбросном канале тепловой электростанции, характеризующемся режимом по T_w , близким к водоемам тропических широт. Кроме того, в сбросном канале создаются неблагоприятные термические условия для аборигенных видов, что обеспечивает ослабление конкуренции для вселенцев. В водоемах-охладителях Сибири массовое развитие тропического вида — моллюска *Potamocorbula amurensis* (Lamarck) отмечено только в зообентосе Беловского водохранилища. Развитие *P. amurensis* было приурочено к зоне максимального подогрева. В июле были отмечены многочисленные кладки этих моллюсков на высшей водной растительности. Вероятнее всего моллюски попали в канал случайно из аквариума, нашли благоприятные условия для размножения и в период исследования в большом количестве встречались на высших водных растениях, преимущественно на валлиснерии. Наличие длительно существующих популяций животных

южных широт в водоемах умеренной зоны может рассматриваться как биоиндикатор их теплового загрязнения [5].

Другую группу инвазий в водоемы-охладители составляют тепловыносливые виды, обитающие в водоемах умеренных широт, но имевшие узкий естественный ареал распространения. Один из таких видов — *Gmelinoides fasciatus* — байкальского происхождения, широко распространяющийся в последние десятилетия в водоемах Евразии, в том числе в водоемах-охладителях. *G. fasciatus* был обнаружен в водоемах-охладителях Беловской и Гусиной ГРЭС [34]. Вселение этого вида повысило продуктивность бентосного зооценоза оз. Гусиного в 4 раза [34]. В Беловском водохранилище на отдельных участках литорали биомасса *G. fasciatus* составляла 48% общей биомассы зообентоса. В водоемах-охладителях Европы наиболее массовый вид-вселенец этой группы — *Dreissena polymorpha* (Pallas) — доминант в зооценозах отдельных участков Игналинского, Курчуганского, Литовского, Запорожского и Чернобыльского водохранилищ [3, 13, 20, 28]. Виды этой группы избегают участков максимального подогрева и встречаются преимущественно в неподогреваемых или слабоподогреваемых зонах водохранилищ — там, где сосредоточены и холодноводные аборигенные виды — и часто составляют конкуренцию этим видам. Так, после непреднамеренного вселения *G. fasciatus* в оз. Гусиное, *Gammarus lacustris* Sars, доминировавший до этого в литорали, перешел в ранг субдоминантов в зоне с естественным режимом по T_w , практически не встречаясь в отепленной зоне [34]. Экспериментально показано [30], что *G. fasciatus* предпочитают зоны более высокой T_w , чем *G. lacustris*, что, вероятно, и определяет распространение гмелиноидеса в подогреваемых водоемах.

Экосистемы водоемов-охладителей, как и других искусственных водоемов, существуют сравнительно короткое время, их биоценозы находятся на стадии формирования состава, структуры и трофических отношений, что является предпосылкой для вселения в них новых видов. Инвазии в искусственные водоемы отмечаются значительно чаще, чем в естественные [6]. Низкий процент инвазийных видов в водоемах-охладителях Сибири, возможно, связан и с коротким периодом их существования: в большинстве водоемов последние гидробиологические исследования были проведены через 12–20 лет после заполнения, а инвазии беспозвоночных животных в Беловское водохранилище впервые были отмечены через 38 лет его существования [37]. Таким образом, в водоемах-охладителях Сибири вероятнее всего следует ожидать фиксации новых инвазийных видов в бентосных и перифитонных сообществах.

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА БЕНТОСНЫХ СООБЩЕСТВ

Фауна водоемов-охладителей различных климатических зон формируется преимущественно за счет аборигенных видов. Однако при длительном тепловом воздействии существенно перестраивается структура бентосных сообществ.

На илистых грунтах профундали исследованных водоемов-охладителей преобладает хирономидно-олигохетный комплекс видов. Доминирующую группу составляют пять родов: *Chironomus* (представленный в разных водоемах *Ch. gr. plumosus* и *Ch. anthracinus* Zett.), *Limnodrilus* (преимущественно *L. hoffmeisteri* Claparede и *L. claparedianus* Ratzel), *Procladius* (*P. ferrugineus* Kieff. и *P. choreus* Kieff.), *Tubifex* (*T. tubifex* Mull.), *Polypedilum* (табл. 2). В глубоководной и отепленной зонах водохранилищ доминируют, как правило, 1–2 вида, что приводит к заметному увеличению индексов доминирования [2, 33, 34]. В подогреваемой зоне многих водохранилищ (озера Кенон и Гусиное, Беловское, Экибастузское, Харанорское водохранилища) отмечено повышение доли олигохет по сравнению с неподогреваемым участком [10, 23, 33, 34, 37].

Увеличение роли олигохет в структуре бентосного сообщества илов особо заметно летом, когда из водоемов вылетают закончившие личиночную стадию развития хирономиды. Незначительная доля олигохет отмечена только в Барабинском водохранилище, где на протяжении всего периода исследований доминировали хирономиды, составлявшие 90–100% биомассы [11]. Увеличение роли олигохет в биомассе зообентоса илов отепленной зоны водохранилищ — общая особенность структуры бентосных сообществ водоемов-охладителей различных природных зон: схожие тенденции отмечены при исследованиях водоемов Литовской и Криворожской ГРЭС, Кольской АЭС [13, 25, 36]. Смена хирономидных ценозов на олигохетные происходит обычно к пятому–седьмому году существования водохранилищ, что, вероятно, связано с формированием в этот период илистых грунтов [1].

В литорали водоемов-охладителей таксономическое разнообразие зообентоса значительно выше, чем в профундали, что в целом характерно и для других лимнических систем [16, 21, 32]. Это связано прежде всего с большим разнообразием биотопов литорали: наряду с заиленными участками в прибрежье встречаются камни, пески, заросли высшей водной растительности. Доминирующий в литорали комплекс видов существенно различается в отдельных водоемах, что в первую очередь связано с различиями качества биотопов. В зооценозах зарослей высшей водной растительности в оз. Гусином доминирует *G. fasciatus* [34], водоеме-охладителе Экибастузской ГРЭС — *Paramysis lacustris* (Czerniavsky) и *G. lacustris* [23], в оз. Кенон — *G. lacustris* [33], в остальных водоемах роль амфипод была невелика.

Среди моллюсков чаще всего доминируют представители р. *Pisidium* и р. *Sphaerium* на мягких субстратах, р. *Lymnaea* — на твердых, среди хирономид в зарослях обычно встречаются личинки р. *Sticoropus* и р. *Glyptotendipes*, среди олигохет в прибрежье доминирует р. *Nais*, среди поденок массовый вид — только *Caenis horaria* (L.).

При исследованиях Беловского водохранилища отмечено упрощение трофической структуры зообентоса: обнаружена общая тенденция вытеснения из бентоса хищников (*P. ferrugineus*, *Cryptochironomus* gr. *defectus*) и фильтраторов (р. *Pisidium*) эври- и детритофагами, способными поглощать грубую пищу (*G. fasciatus*, р. *Lymnaea*, *Glyptotendipes glaucus* (Meigen)).

При исследовании водоема-охладителя Новомичуринской ГРЭС [31] также отмечено, что хищники наиболее чувствительны к органическому и тепловому загрязнению, наименее чувствительны к действию обоих факторов плотатели грунта (олигохеты), собиратели занимают промежуточное положение, образуя максимальную долю биомассы при умеренном воздействии факторов. Снижение доли хищников при евтрофировании и термофикации — по-видимому, общая специфическая реакция сообществ на изменение условий обитания и ведет к существенному снижению разнообразия и стабильности экосистем [35].

ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ И БИОМАССЫ

Биомасса зообентоса водоемов-охладителей подвержена значительным многолетним колебаниям, что свидетельствует о неустойчивом состоянии бентосных зооценозов этих водоемов. К сожалению, в большинстве водоемов-охладителей Сибири не проводилось регулярных многолетних гидробиологических исследований. Наиболее длительный ряд наблюдений имеется для Беловского водохранилища. Биомасса зообентоса на мягких грунтах в 1978 г. (1.4–22.2 г/м²), 2002 г. (4–18, среднее 12.4) и 2006 г. (5–28 г/м², среднее 14.6 г/м²) имели сходные значения [37]. За весь период наблюдений в Беловском водохранилище был отмечен один подъем количественных показателей развития зообентоса — в 1989 г. (0.7–46.2 тыс. экз/м² и 1.0–84.6 г/м²) [37].

В оз. Кенон проводили разовые съемки в 1966–1970 гг., после длительного перерыва были проведены исследования в течение всего вегетационного сезона в 1985 и 1986 гг. и весной 1988–1991 гг. За этот период отмечено 2 пика развития зообентоса: в 1985 и 1989 гг. [33]. Следует отметить, что и в период максимального развития зообентоса, и в период его относительной стабилизации количественные показатели развития зообентоса Беловского водохранилища и оз. Кенон близки.

Существенные колебания средней биомассы зообентоса (с 14 до 29 в одном пруду и с 34 до 61 г/м² — в другом) были отмечены и при гидробиологических исследованиях в 1976–1977 гг. Барабинских прудов; резкое увеличение биомассы также носило временный характер [11]. Биомасса зообентоса водоемов-охладителей Сибири в период стабилизации составляет, вероятно, 10–15 г/м². Возможное исключение — зообентос оз. Гусино, в котором существенное увеличение биомассы зообентоса (в 4 раза) произошло не за счет аборигенных видов, а в результате инвазии *G. fasciatus* [34]. Учитывая необратимость инвазии, можно предположить, что в период относительной стабилизации биомасса зообентоса оз. Гусино будет превышать аналогичные показатели других водоемов-охладителей Сибири в 3–4 раза.

Быстрое кратковременное возрастание биомассы бентоса после затопления было отмечено и для ряда непогреваемых водохранилищ (Горьковское, Куйбышевское, Новосибирское, Каунасское). Период увеличения биомассы зообентоса (“мотылевая стадия”) связывают с затоплением обширных пойм, заросших растительностью и способных давать большое количество легкоусвояемого детрита [14].

Сезонные изменения численности и биомассы зообентоса исследовали в водоемах-охладителях Читинской ТЭЦ и Березовской ГРЭС [2, 33]. В этих водоемах отмечено снижение общей биомассы зообентоса и увеличение в ней доли гомотопных гидробионтов летом. Это связано с вылетом в этот период амфибиотических насекомых (преимущественно хирономид), окончивших водную стадию развития, и характерно также для непогреваемых водоемов с гетеротопными доминантами в зообентосе [16].

ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ

Водоемы-охладители, кроме основной термической нагрузки, подвергаются и другим видам загрязнения. Особое внимание к экологическому состоянию водоемов-охладителей связано с их использованием для рекреации, рыболовства, рыбноводства, сельского хозяйства и питьевого водоснабжения.

Большинство водоемов-охладителей ГРЭС находятся в непосредственной близости от угольных разрезов, что создает дополнительную нагрузку на донные зооценозы в виде осаждающейся в ДО угольной пыли. В оз. Гусино дополнительно сбрасываются шахтные воды, содержащие угольную пыль и нефтепродукты [34].

Сбросные воды ГРЭС не только имеют повышенную T_w , но и являются источником химического загрязнения водохранилищ. В сбросных водах

обычно повышена концентрация нефтепродуктов, фенолов, сульфатов, цинка, меди, свинца [33, 34]. Концентрация этих веществ выше в водохранилищах с высокой скоростью внутреннего водообмена. Показано, что при увеличении T_w до 30°C токсичность ионов меди, цинка, кадмия для зообентоса возрастает на 2–4 порядка [18]. Кроме того, с повышением T_w ускоряется метаболизм животных и химические элементы активнее накапливаются в организме. Однако в оз. Гусином не было выявлено влияния подогрева на накопление тяжелых металлов в организмах зообентоса и рыбы, что, возможно, связано с низкой тепловой нагрузкой на водоем, невысоким коэффициентом водообмена и выбором для анализа широко мигрирующих видов [34]. В других водоемах Сибири таких исследований не проводилось.

Наиболее распространенный способ дополнительного использования подогретой воды ГРЭС – тепловодное садковое рыбоводство. Повышенная T_w способствует ускорению темпов роста и созревания рыбы; в то же время остатки корма и метаболиты рыб из садков попадают в водоем и становятся источником дополнительного органического загрязнения водохранилища. Садковые рыбные хозяйства были организованы на водоемах-охладителях Экибастузской, Гусинозерской и Беловской ГРЭС [23, 34, 37]. В районе садкового хозяйства водоема-охладителя Беловской ГРЭС отмечено существенное ухудшение экологической ситуации, выразившееся в увеличении олигохетных индексов, а в отдельные периоды (1989 г.) – в угнетении бентосного сообщества. В течение всего периода исследований этот участок характеризовался как грязный и сильно грязный. В зоне садкового хозяйства оз. Гусино также доминировали типичные представители загрязненных биотопов – олигохеты *Limnodrilus udekemianus* и *T. tubifex* [34]. При гидробиологическом исследовании Экибастузской ГРЭС не было выявлено влияния садкового хозяйства на характер зообентоса водоема [23]. Возможно, это было связано с тем, что в период исследований садковое хозяйство только организовывалось и работало нерегулярно.

Дополнительное поступление ОВ в водоемы-охладители обеспечивается и в результате их рекреационного использования. ГРЭС обычно строятся в промышленно развитых и сравнительно густонаселенных районах, и водоемы-охладители становятся наиболее доступным местом отдыха местных жителей. Кроме того, особую привлекательность для отдыха обеспечивает повышенная T_w и богатые рыбные ресурсы таких водоемов. Все виды отдыха (купание, рыболовство, катание на моторных лодках, организованный и неорганизованный отдых) негативно влияют на береговую и прибрежную зоны, на поступление в водоемы БВ и загрязняющих

веществ; наибольший ущерб водоемам наносит неорганизованный отдых [29].

Повышение первичной продукции водоемов-охладителей, связанное со стимулирующим влиянием подогрева воды на растительные сообщества, наряду с дополнительным поступлением ОВ в результате рекреационного и рыбохозяйственного использования приводит к высокому уровню содержания ОВ в водохранилище. Взаимодействие термофикации и увеличения количества ОВ существенно усиливает результирующие изменения биоты [15]. Высокая доля олигохет в зообентосе, преобладание видов-индикаторов поли- и β -мезосапробных условий, низкое таксономическое разнообразие при высоком уровне доминирования отдельных видов свидетельствуют о высоком органическом загрязнении отепленной части профундали водоемов-охладителей. Трофический статус водоемов-охладителей Березовской, Гусинозерской, Беловской ГРЭС соответствует мезотрофному классу, Барабинской, Читинской ГРЭС – эвтрофному [2, 11, 33, 34, 37].

ВЫВОДЫ

Анализ видового состава, особенностей пространственного распределения, динамики количественных показателей зообентоса водоемов-охладителей позволил выявить как общие черты, присущие бентосным сообществам водоемов данного типа, независимо от их расположения, так и особенности зообентоса водоемов-охладителей Сибири (умеренных широт).

Некоторые из выявленных закономерностей развития зообентоса характерны не только для водоемов-охладителей, но и для непогреваемых водохранилищ. К ним относятся следующие:

- хируномидно-олигохетный комплекс видов с доминированием видов из пяти родов: *Chironomus*, *Limnodrilus*, *Procladius*, *Tubifex*, *Polypedium*;

- резкие многолетние колебания биомассы зообентоса, особенно на начальных этапах формирования сообществ;

- увеличение доли гомотопных гидробионтов летом;

- высокое доминирование отдельных видов в профундали;

- увеличение таксономического разнообразия в прибрежной зоне, особенно в зарослях макрофитов.

Специфические черты развития зообентоса водоемов-охладителей различных природных зон следующие:

- доминирование олигохет в отепленной зоне;

- изменение продолжительности вегетационного сезона, жизненных циклов, темпов роста отдельных видов;

приоритетное значение типа грунтов как фактора пространственного распределения бентосных беспозвоночных; T_w имеет второстепенное значение.

Отличия водоемов-охладителей Сибири связаны, прежде всего, со сравнительно низкой естественной T_w сибирских водоемов, которая даже при подогреве не превышает максимум по T_w для гидробионтов. В результате в водоемах-охладителях Сибири, в отличие от южных широт, искусственное повышение T_w благоприятно отражается на развитии донных сообществ в течение всего года: в большинстве исследованных водоемов отмечено увеличение численности и биомассы зообентоса в результате подогрева, в некоторых водоемах увеличивается и таксономическое разнообразие. Влияние подогрева на зообентос водоемов-охладителей южных широт не так однозначно: искусственное повышение T_w в водоеме стимулирует развитие беспозвоночных только в период с низкой естественной T_w (осенне-весенний период). Снижение в водоемах-охладителях Березовской ГРЭС и Читинской ТЭЦ биомассы зообентоса летом обусловлено массовым вылетом хирономид [2, 33], а не угнетением бентосных сообществ в результате перегрева, как это наблюдается в водоемах-охладителях Украины.

Большинство исследователей зообентоса водоемов-охладителей различных природных зон указывает на стимулирующее влияние умеренного подогрева на гидробионтов, выражающееся в увеличении видового состава, количественных характеристик, сокращении жизненных циклов отдельных видов, увеличении продукции популяций. Наиболее заметно стимулирующее влияние подогрева на зообентос водоемов-охладителей в субарктических и умеренных широтах: низкие естественные T_w препятствуют перегреву водных масс летом до критических значений для беспозвоночных, в то же время способствуют расселению stenotherмных термофилов, не встречающихся в этих природных зонах в естественных условиях.

Автор выражает искреннюю признательность В.В. Кириллову (ИВЭП СО РАН) и О.И. Мицкевич (ГосНИОРХ) за информационно-методическую помощь, оказанную при подготовке данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 325 с.
2. Андрианова А.В., Заворуева В.В., Заделенов В.А. и др. Оценка современного состояния экосистемы водоема-охладителя Березовской ГРЭС (Красноярский край) // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 195–205.
3. Афанасьев С.А. Динамика видового состава зооперифитона водоема-охладителя атомной электростанции // Гидроэкологические проблемы внутренних водоемов Украины. Киев: Наук. думка, 1991. С. 64–70.
4. Бажина Л.В. Зообентос и качество вод р. Чулым в районе г. Назарово и Назаровской ГРЭС // Тр. ЗапСибНИИ. 1984. Вып. 62. С. 16–19.
5. Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Экзотические виды фитобентоса и зообентоса водоемов-охладителей АЭС как биоиндикаторы теплового загрязнения // Вестн. МГУ. Сер. 16, Биология. 2001. № 3. С. 22–23.
6. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.: КМК, 2004. 436 с.
7. Браславский А.П., Кумарина М.Н., Смирнова М.Е. Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 253 с.
8. Владимиров М.З., Тодераш И.К. Качественный состав и количественное развитие макрозообентоса // Биопродукционные процессы в водохранилищах-охладителях ТЭС. Кишинев: Штиинца, 1988. С. 130–138.
9. Водоем-охладитель Ладыжинской ГРЭС. Киев: Наук. думка, 1978. 132 с.
10. Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС и его жизнь. Новосибирск: СО РАН, 2005. 192 с.
11. Волгин М.В., Куксн М.С., Сипко Л.Л., Тимофеева М.В. Гидробиологический режим прудов-охладителей Барабинской ГРЭС // Гидробиол. журн. 1982. Т. 18. № 5. С. 52–58.
12. Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций СССР. Киев: Наук. думка, 1971. 297 с.
13. Григалис А., Рачюнас Л. Изменение сообществ зообентоса в процессе формирования охладителя // Теплоэнергетика и окружающая среда: Функционирование популяций и сообществ водных животных в охладителе Литовской ГРЭС. Вильнюс: Мокслас, 1984. Т. 4. С. 27–35.
14. Девяткин В.Г., Баканов А.И., Корелякова И.Л. и др. Гидробиология водохранилищ и рек в зоне их влияния // Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. С. 138–205.
15. Домпальм Е.И. Оценка двухфакторного антропогенного воздействия на экосистемы водоемов-охладителей электростанций. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский гос. горный ин-т, 1996. 20 с.
16. Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа. М.: Науч. мир, 2004. 296 с.
17. Ежегодник качества поверхностных вод и эффективности проведения водоохраных мероприятий по территории деятельности Западно-Сибирского межрегионального территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 2004 год. Новосибирск, 2005. Ч. 2. 104 с.
18. Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
19. Катанская В.М. Растительность водохранилищ-охладителей тепловых электростанций Советского Союза. Л., 1979. 278 с.
20. Кафтанникова О.Г., Протасов А.А., Сергеева О.А. и др. Экология водоема-охладителя атомной электростанции. Деп. ВИНТИ 01.06.87. № 4553-В87. Киев, 1987. 95 с.

21. *Клишко О.К.* Зообентос озер Забайкалья. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2001. 208 с.
22. *Крючков В.В., Моисеенко Т.И., Яковлев В.Л.* Экология водоемов-охладителей в условиях Заполярья. Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1985. 135 с.
23. *Лаврентьева Г.М., Романова А.П., Терешенкова Т.В. и др.* Характеристика водоема-охладителя Экибастузской ГРЭС-1 // Влияние теплового и органического загрязнения на биоту водоемов-охладителей. СПб., 1995. С.7–69.
24. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
25. *Моисеенко Т.И., Яковлев В.А.* Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 221 с.
26. *Мордухай-Болтовской Ф.Д.* Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (обзор) // Тр. Ин-та биологии внутренних вод АН СССР. 1975. Вып. 27. С. 7–69.
27. *Морозова О.Г., Репях С.М., Морозов С.В.* Влияние затопленных растительных остатков на формирование гидрохимического режима водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 // Химия растительного сырья. 2001. № 1. С. 75–82.
28. *Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др.* Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. Киев: Наук. думка, 1991. 192 с.
29. *Прыткова М.Я.* Управление экосистемами озер-охладителей // География и природ. ресурсы. 2000. № 4. С. 158–162.
30. *Тимофеев М.А.* Сравнительная оценка отношения байкальских гаммарид и голарктического *Gammarus lacustris* к абиотическим факторам. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 2000. 20 с.
31. *Шуйский В.Ф., Чистякова С.В., Устюжанина Н.В.* Влияние теплового и органического загрязнения на структуру макробиоценозов водоема-охладителя Новомичуринской ГРЭС // Влияние рыбного интенсивного хозяйства различных типов на экосистему водоемов-охладителей. Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. 1990. Вып. 309. С. 56–65.
32. *Щербина Г.Х.* Структура и функционирование биоценозов донных макробеспозвоночных верхневолжских водохранилищ // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России. Ярославль, 2002. С. 121–142.
33. Экология городского водоема. Новосибирск: СО РАН, 1998. 260 с.
34. Экология озера Гусиное. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1994. 199 с.
35. *Яковлев В.А.* Трофическая структура зообентоса – показатель состояния водных экосистем и качества воды // Вод. ресурсы. 2000. Т. 27. № 2. С. 237–244.
36. *Янакаев А.Ю.* Динамика и распределение зообентоса водоема-охладителя Криворожской ГРЭС // Гидроэкологические проблемы внутренних водоемов Украины. Киев: Наук. думка, 1991. С. 89–93.
37. *Яныгина Л.В., Кириллов В.В., Крылова Е.Н.* Оценка современного состояния зообентоса и зооперифитона водоема-охладителя Беловской ГРЭС // Проблемы региональной экологии. 2008. № 6. С. 37–43.