

# БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОВСКОЙ ГРЭС

В.В. Кириллов, Е.Ю. Зарубина, Е.Ю. Митрофанова, Л.В. Яныгина, Е.Н. Крылова

*На основе анализа многолетних данных по составу, структуре и функциональным характеристикам экосистемы Беловского водохранилища установлено, что постоянное и длительное (на протяжении 38 лет) поступление подогретых сбросных вод тепловой электростанции привело к изменению не только функциональных характеристик планктонных и бентосных сообществ, но и определило развитие новых, не характерных для данного региона термофильных видов водорослей, высших водных растений и моллюсков.*

## ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы водоемов-охладителей, в первую очередь проблема "теплового загрязнения" гидросферы, связанного с поступлением подогретых сбросных вод тепловых и атомных электростанций с конца пятидесятих годов прошлого столетия привлекли внимание многих исследователей в разных странах [1].

За прошедший период было установлено, что изменения в экосистемах водоемов в результате подогрева в значительной степени зависят не только от типа водного объекта, используемого для охлаждения (река, озеро, водохранилище), системы водоснабжения электростанции (оборотная или прямоточная), параметров охладителя и тепловой нагрузки на него, но и от ландшафтно-географической зоны, в которой расположен водоем-охладитель [2, 3, 4, 5].

Влияние мощного постоянно действующего экодинамического фактора – поступления дополнительной тепловой энергии в сочетании с гидродинамическим возмущением определяет экологические эффекты, локальные по пространству, но приводящие к глубоким перестройкам водных экосистем. Летом длительное повышение температуры воды выше 30°C действует угнетающе на разнообразие и обилие гидробионтов [6]. Зимой наблюдается стимуляция их развития, сглаживание сезонной динамики.

Цель работы - оценка долговременного и постоянного воздействия сброса подогретых вод на состав и структуру биоценозов водоема-охладителя Беловской ГРЭС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на основе ретроспективных данных за период с 1972 г. по

1989 г. [5, 7, 8, 9, 10, 11] и результатов натуральных исследований в 2001-2002 гг. по составу, структуре и функциональным характеристикам биогидроценоза Беловского водохранилища.

Водоохранилище создано в 1964 г. регулированием стока реки Ини у г. Белово Кемеровской области для охлаждения подогретых сбросных вод Беловской ГРЭС. Это - равнинное водохранилище руслового типа сезонного регулирования. Длина водоема 10 км, ширина – максимальная 2,3 км, минимальная – 1,0 км, глубина – максимальная 12,0 м, средняя – 4,4 м. Объем водных масс 60 млн. м<sup>3</sup>. Площадь зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ) 13,6 км<sup>2</sup>, площадь мелководий до 2,0 м при НПУ – 5,4 км<sup>2</sup>, протяженность береговой линии – 91 км (рис.). Площадь водосборного бассейна до створа гидроузла ГРЭС – 1970 км<sup>2</sup> [8]. Значительную долю территории водосбора составляют сельскохозяйственные угодья.

Одна из особенностей Беловского водохранилища как и других водоемов-охладителей с оборотной системой водоснабжения – большая интенсивность внутреннего водообмена (около 25 раз в год) по сравнению с внешним (около 3 раз). По площади акватории водоем относится к малым водохранилищам, по средней глубине – к мелководным водоемам. Водоохранилище является рыбохозяйственным водоемом II категории, используется для водоснабжения Беловской ГРЭС, промышленных предприятий г. Белова, орошения и рекреации.

Современное исследование фитопланктона, макрофитов и зообентоса проводили в марте 2001 г.; январе, апреле, июле, августе и сентябре 2002 г. стандартными методами [12, 13]. Всего было отобрано и проанализировано 24 количественные пробы фитопланктона, около 300 гербарных листов,

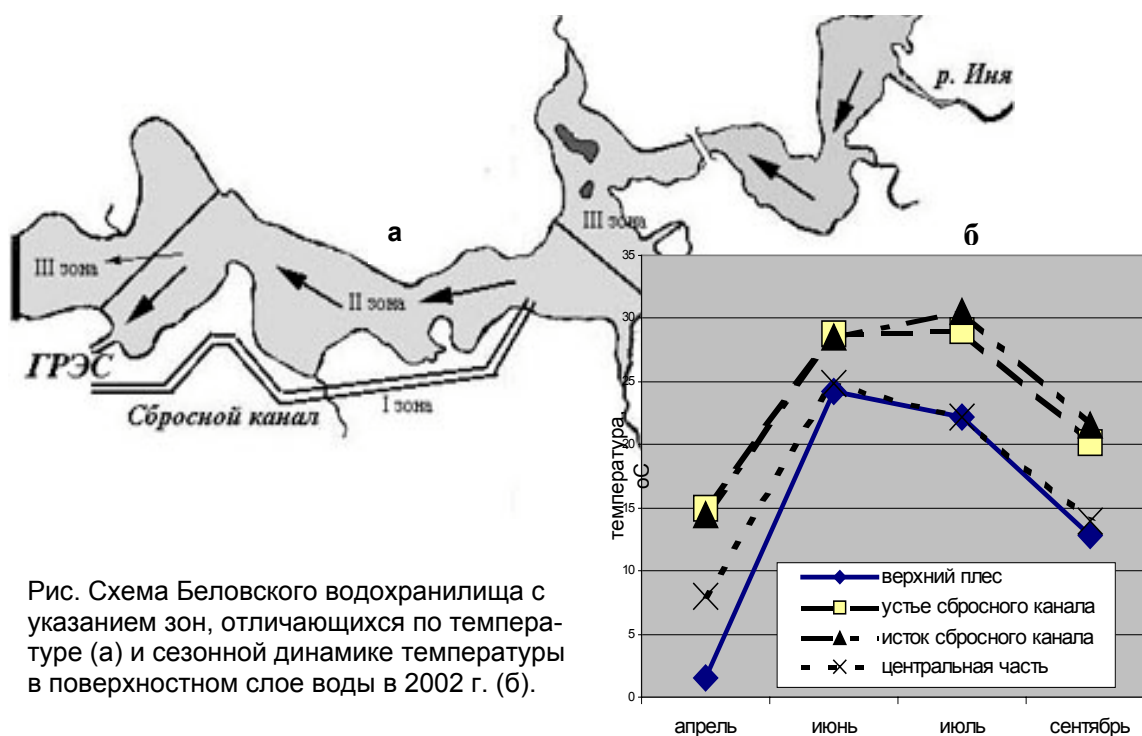


Рис. Схема Беловского водохранилища с указанием зон, отличающихся по температуре (а) и сезонной динамике температуры в поверхностном слое воды в 2002 г. (б).

30 геоботанических описаний водных и прибрежно-водных фитоценозов, 45 проб зообентоса (16 качественных и 29 количественных). Для оценки качества воды использован индекс сапробности, рассчитанный по численности методом Пантле и Букка в модификации Сладечека [14, 15], индексы Пареле [16] и Попченко [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Термический режим.** Вода поступает на ГРЭС по водозаборному каналу из приплотинного участка и сбрасывается по каналу длиной 6,45 км в среднюю часть водохранилища. В результате образуется циркуляционный поток охлаждающейся воды, охватывающий около 40% акватории.

Среднемесячная температура воды р. Ини в теплый период года не превышает 18°C, в холодный снижается до 0,4-1,1°C. Водная масса в циркуляционном потоке сбросных подогретых вод в теплый период года может превышать 30°C, в холодный сохраняется на уровне 5,4-10,1°C.

По степени влияния подогрева в водоеме можно выделить три зоны (см. рис.):

**I зона** – постоянного сильного подогрева, расположенная непосредственно за местом сброса теплых вод. Это сбросной канал и часть водохранилища в районе его устья. В

июле 2002 г. максимальная температура воды здесь достигала 30,5 °С.

**II зона** – умеренного подогрева, удаленная на некоторое расстояние от устья сбросного канала. В течение всей зимы за счет поступления теплых вод из сбросного канала на этом участке ледяной покров не образуется или существует короткое время, в результате чего значительная часть акватории водохранилища остается открытой.

**III зона** – слабо подогреваемая, расположенная в верхнем плесе и приплотинной части водохранилища. Уровень тепловой нагрузки в этих частях водохранилища близок к естественному.

Наибольшее отличие термического режима различных зон водохранилища наблюдается в холодное время года (см. рис.).

По степени влияния теплых сбросных вод ГРЭС (среднегодовой подогрев равен 5°C), согласно классификации М.Л. Пидгайко [18], водохранилище относится к водоемам с умеренным подогревом.

**Фитопланктон.** Видовое разнообразие фитопланктона – одна из важнейших характеристик биогидроценозов, как естественных, так и искусственно созданных водоемов – находится в зависимости от абиотических факторов среды, в первую очередь температуры воды, и изменяется в ходе эволюции экосистемы водоема. В 1977-1980 гг. в фитопланктоне р. Ини и Беловского водохранили-

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОВСКОЙ ГРЭС

ща было выявлено 184 вида водорослей из 7 отделов [10], обычных для лимнических систем Западной Сибири, в 2001-2002 гг. – 176 видов из 8 отделов. Увеличение числа отделов связано с тем, что ранее отделы Cryptophyta и Dinophyta объединялись в один – Pyrogophyta. Полный список водорослей планктона в настоящее время составляет 297 видов (332 вида и разновидности).

Близкое к этому число видов (261-337) обнаружено в водоемах-охладителях тепловых и атомных электростанций Украины [19]. В фитопланктоне Белоярского водохранилища – водоеме-охладителе Белоярской АЭС, расположенного на Среднем Урале, выявлено 175 видов [20]. При этом рост таксономического разнообразия фитопланктона во всех водохранилищах отмечался в зонах подогрева, образуемых сбросными водами.

В Беловском водохранилище в течение последних 25-ти лет наблюдается устойчивость планктонных альгоценозов на уровне отделов, изменения отмечены в основном на уровне таксонов более низкого ранга. Как в 1977-1980 гг. [10], так и в настоящее время водоросли планктона реки почти на 100% обнаруживаются в фитопланктоне водохранилища. В связи с зарегулированием стока и образованием новых биотопов планктонные ценозы водохранилища обогащаются новыми видами.

В 2001-2002 гг. в составе планктона водохранилища преобладали бентосные формы (44% от общего числа таксонов), что характерно для мелководных водоемов с многообразными биотопами в прибрежной зоне. О снижении проточности водоема свидетельствует преобладание в составе фитопланктона реофобов (41%), которым даже уступают индифференты (33%).

По отношению к температуре в фитопланктоне Беловского водохранилища и р. Ини выявлено 19 stenothermных видов (или 15,6%). Диапазон температур, при которых могут встречаться эти виды, по литературным данным [21], составляет менее 10°C. Остальные виды принадлежат к мезо-, мезозври- и эвритермным видам, а диапазон температур, при которых они могут развиваться, достигает 40°C, что свидетельствует о большой приспособляемости водорослей к условиям среды, в том числе, к повышенной температуре воды. Только шесть из обнаруженных видов могут переносить температуру воды до +41°C. Это *Amphora ovalis* Kütz., *Cocconeis placentula* Ehr., *Diatoma vulgare* Bory, *Hantzschia amphioxys* (Ehr.) Grun., *Meridion*

*circulare* Ag. и *Rhoicosphaenia curvata* (Kütz.) Grun.

В спектре отделов фитопланктона Беловского водохранилища по числу видов преобладают зеленые водоросли (52,2% в 1977-1980 гг. и 49% в 2001-2002 гг.), что свойственно многим водохранилищам-охладителям. Например, в фитопланктоне Белоярского водохранилища представители отдела Chlorophyta составляют 48% от общего состава [20], Кураховского и Зуевского – по 40, Ладыжинского – 49, Чернобыльского – 50 [19], Ивановского – 51,5% [22]. Даже в водохранилищах Ангарского каскада, больших по площади и имеющих более низкие среднегодовые температуры воды, зеленые водоросли также преобладают в фитопланктоне по числу видов: в Иркутском – 45,3%, Братском – 53,2, Усть-Илимском – 52,7 и Богучанском – 46,6% [23]. В то же время, соотношение отделов водорослей, характерное для речного планктона с преобладанием диатомовых, сохраняется в тех водохранилищах, которые расположены в более суровых климатических условиях и речной планктон трансформируется в них не так значительно. Например, в фитопланктоне Красноярского водохранилища зеленые водоросли занимают второе ранговое место (31,7%) [24].

Видовое разнообразие планктонных альгоценозов водохранилища колеблется в зависимости от погодных условий, и, как следствие – температуры воды. Сезонные изменения температуры воды контролируются в основном количеством проникающей в водную толщу солнечной радиации и стабильностью водных масс, в свою очередь зависящих от развития синоптических процессов в атмосфере [25]. Если число видов в фитопланктоне Беловского водохранилища – величина не сильно варьирующая в течение вегетационного периода (сказывается влияние подогретых вод ГРЭС в зимне-весенний период), то смена видов, как в общем составе, так и в доминантном комплексе – явление, наблюдавшееся как ранее [10], так и в настоящее время.

В летне-осеннем фитопланктоне Беловского водохранилища преобладают в основном зеленые (*Pediastrum simplex* Meyen), на некоторых участках водохранилища в массе развиваются синезеленые водоросли (*Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs), в зимне-весеннем – диатомовые, при этом значительный вклад в общую численность фитопланктона вносит *Aulacosira granulata* var. *angustissima* (Ehr.) O.Mull. Видовое разнообразие

разие достигает максимума в периоды перестройки сообщества при смене погодных условий [26]. В фитопланктоне Беловского водохранилища (водозаборный канал) в марте 2001 г. было отмечено 27 видов. В первой декаде июля 2002 г. было обнаружено 19 видов, в сентябре их число возросло до 36. В зимне-весенний период в естественных водоемах наблюдается минимальное развитие водорослей, в водоемах с искусственным подогревом воды разнообразие и обилие фитопланктона, напротив, значительное. В Беловском водохранилище, как отмечали ранее [10], так и при исследованиях в 2001-2002 гг., было выявлено более половины приводимых для данного водоема видов водорослей, причем, неизменным компонентом зимнего планктона были эвгленовые, которые в сибирских водохранилищах в этот период почти отсутствуют.

Зарегулирование стока рек и создание на них водохранилищ приводит к упрощению структурной организации фитопланктона и снижает уровень разнообразия планктонных сообществ (индекс Шеннона-Уивера). В Беловском водохранилище индекс видового разнообразия фитопланктона в начале его существования составлял до 4,00 бит на единицу массы [10], при исследованиях в 2001-2002 гг. – 1,06-2,63, что может в целом свидетельствовать о переходе экосистемы водохранилища в зрелое состояние, так как при этом экосистемы имеют более низкие показатели видового разнообразия (Горьковское водохранилище – 2,02), чем молодые и те, где роль боковой приточности как фактора поддержания высокого разнообразия, ярче выражена (Чебоксарское водохранилище – 2,35) [27].

Количественные характеристики фитопланктона Беловского водохранилища за последние 25 лет изменились незначительно. В 1977 г. в водозаборном канале биомасса фитопланктона в марте была зафиксирована на уровне  $0,8 \text{ г/м}^3$ , в апреле –  $0,4 \text{ г/м}^3$ , максимальная в январе-марте –  $5,5 \text{ г/м}^3$ . Наибольшая за сезон биомасса фитопланктона отмечена в зоне циркуляционного потока охлаждающей воды – до  $25,0 \text{ г/м}^3$  [10]. Сезонная динамика фитопланктона подогреваемых участков отличалась удлинением вегетационного периода, пониженным обилием синезеленых водорослей. В апреле 2002 г. максимальная биомасса фитопланктона составила  $2,1 \text{ г/м}^3$ , максимальная за период открытой воды –  $26,6 \text{ г/м}^3$ . Если количественные показатели фитопланктона не претерпели

значительных изменений по сравнению с предыдущими исследованиями, то качественный состав фитопланктона водохранилища, особенно состав его доминантов, изменился. Синезеленые водоросли в отдельные периоды года перешли в разряд массовых. В целом по максимальной биомассе фитопланктона Беловское водохранилище уступает Братскому –  $320 \text{ г/м}^3$  [28], Ивановскому – более  $140$  [22], Зуевскому –  $564$ , Ладыжинскому –  $39,4$ , довольно близко к Чернобыльскому –  $18,3$ , значительно превышает Кураховское –  $12,6$  [19], Угличское –  $10,2 \text{ г/м}^3$  [29].

Индикаторная значимость фитопланктона проявляется в наличии видов-индикаторов органического загрязнения – 114 таксонов (34,3% от общего состава). Отмечены представители всех зон сапробности, кроме ксеносапробной. Большинство видов является бета-мезосапробами (70%), что свидетельствует о средней степени загрязнения органическими веществами.

По отношению к галобности наиболее многочисленны олигогалобы, в том числе индифференты (79%), галофилы составляют всего 11%. По отношению к рН среды наиболее представительны группы индифферентов (48%) и алкалифилов (37%).

В эколого-географическом спектре преобладают, в основном, космополиты (85%). Бореальные виды составляют всего 11%, а аркто-альпийские – 4%. Эколого-географическая характеристика фитопланктона Беловского водохранилища сходна с таковой водоема-охладителя Белоярской ГРЭС [20]. В целом по величине биомассы фитопланктона и индексу сапробности (до 2,29 в апреле) санитарно-биологическое состояние воды Беловского водохранилища можно отнести к классу удовлетворительной чистоты или загрязненное, по разряду качества – слабо-сильно загрязненное, ранг качества – в пределах 5-7, зона сапробности – бета-альфа-мезосапробная [30]. О неблагоприятных условиях в водоеме, изменении качества его воды в сторону ухудшения и снижении потенциала самоочищения указывает более интенсивное развитие синезеленых водорослей.

**Макрофиты.** Флора макрофитов Беловского водохранилища включает в себя 48 видов, относящихся к 32 родам, 20 семействам и 3 отделам. Ведущие по числу видов семейства – Potamogetonaceae, Poaceae и Cyperaceae характерны и для многих равнинных водохранилищ [31, 32]. По сравнению с данными

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОВСКОЙ ГРЭС

ми предыдущих исследователей [8, 9] таксономический состав флоры водохранилища увеличился с 1972 г. – на 27 видов, а с 1978–1979 гг. на 17 видов. Увеличилось видовое разнообразие семейств Potamogetonaceae, Sureraceae, Poaceae, были обнаружены новые семейства Equisetaceae, Najadaceae, Araceae, Scrophulariaceae. Если в период с 1972 по 1978 гг. обогащение видового состава происходило в основном за счет редко встречающихся в водоеме видов, то в настоящее время некоторые из этих видов (*Equisetum fluviatile* L., *Spirodella polyrhiza* (L.) Schleiden) уже широко распространены по водоему.

В ареалогическом спектре флоры преобладают голарктические и евразийские виды (71% всех видов), что свидетельствует, по мнению П.А. Волобаева [33], о наличии широких связей района исследований в прошлом с флорами голарктики и палеоарктики. Довольно высокое содержание космополитных видов (21%) отражает общую закономерность, характерную для водных флор Северного полушария. Региональные особенности формирования флоры обуславливают присутствие в ее составе европейско-сибирско-восточноазиатских, европейско-среднеазиатско-южносибирских и азиатских видов (21%), относительно небольшой удельный вес которых свидетельствует о невысокой автохтонности флоры Беловского водохранилища. В целом, ареалогический спектр флоры Беловского водохранилища очень близок с таковым расположенного в том же регионе водохранилища-охладителя Южно-Кузбасской ГРЭС [33].

Специфику термического режима водохранилища-охладителя подчеркивает наличие в структуре флоры макрофитов термофильных и эвритермных видов. К термофильному элементу флоры, согласно П. А. Волобаеву [33], относятся *Potamogeton crispus* L., *Hydrilla verticillata* (L.) Rojela, *Vallisneria spiralis* L., *Caulinia minor* (All.) Coss. et Germ., отмеченные только в зоне влияния теплых вод. *Vallisneria spiralis* относится к группе евросубтропических видов [9]. Однако в связи с распространением этого вида на участках водоемов, подверженных термальному загрязнению, ее ареал расширился [34]. В настоящее время валлиснерия обитает во многих водоемах-охладителях тепловых и атомных электростанций европейской части России, Урала и Украины [35, 36, 37]. Кроме того, валлиснерия – аквариумный вид, в связи с чем ее попадание в водоем-охладитель,

обычно расположенный рядом с населенным пунктом, является вполне вероятным. В Беловском водохранилище валлиснерия встречается не только в зоне постоянного сильного подогрева (сбросной канал), но и в самом водохранилище, в зоне умеренного подогрева вод. *Caulinia minor*, межледниковый реликт, отмечена только на одном участке водохранилища, также в зоне влияния теплых вод.

Эвритермный элемент флоры представляют виды с широким температурным диапазоном: виды рода *Potamogeton*, *Ceratophyllum demersum* L., *Spirodella polyrhiza*, *Persicaria amphibium* (L.) B.F.Gray. и др., пороговые значения теплоустойчивости которых достигают температур 38–43°C [38]. Большинство растений этой группы встречаются как в зоне влияния подогрева, так и на непогреваемых участках водохранилища. Термофильные и эвритермные элементы занимают значительное положение (29,5%) в структуре флоры макрофитов Беловского водохранилища.

В первые годы существования водохранилища наблюдалось интенсивное развитие воздушно-водной растительности, что характерно для начальной стадии существования многих водохранилищ [32]. В настоящее время наблюдается стадия развития погруженных видов, занимающих большую часть акватории водоема. Растительный покров характеризуется мозаичностью и выраженной поясностью. Заросли располагаются как полосой вдоль берегов и островов, так и отдельными пятнами по акватории водохранилища.

Сравнивая характер распределения высших водных растений по водохранилищу в 1972, 1978–1979 и 2002 гг., можно отметить продвижение растительности в низовья водохранилища, включая открытые участки акватории. В настоящее время практически вся акватория водоема с глубинами до 3,5 м занята водной растительностью. Произошло увеличение видового разнообразия и степени развития фитоценозов и в верховьях. На современном этапе наряду со «старыми» доминантами *Potamogeton lucens* и *Myriophyllum spicatum* L., широкое распространение по всей акватории водохранилища на глубине от 0,5 до 3,5 м получили также *Potamogeton pectinatus* L., формирующий моновидовые сообщества с проективным покрытием до 100% и *Potamogeton crispus* – до 80%. Практически во всех водных фитоценозах отмечены *Lemna minor* L. и *Spirodella polyrhiza*, образующие в прибрежно-водных ценозах участки

с проективным покрытием до 100%. Как и в первое десятилетие существования водохранилища [9], среди прибрежно-водной растительности доминируют формации *Phragmiteta australis* и *Typheta angustifoliae*, однако на отдельных участках водохранилища их замещают формации *Equiseteta fluviatilis* и *Typheta latifoliae*, что свидетельствует о переходе водохранилища на следующую стадию развития.

Индекс сапробности воды по Пантле и Букку с 1978-1979 гг. не изменился и в среднем равен 1,7, что по существующей классификации [30] соответствует бета-мезосапробным и мезоэвтрофным водам.

Таким образом, как и предполагали ранее [8], развитие растительности Беловского водохранилища пошло по пути увеличения разнообразия видового состава и изменения в составе доминантного комплекса. При этом увеличились как площади зарастания отдельных частей водохранилища, так и проективное покрытие фитоценозов, следовательно, динамика видового состава высшей водной растительности свидетельствует о тенденции к повышению трофности водоема.

**Зообентос.** В зообентосе Беловского водохранилища в 2002 г. было отмечено 137 видов и таксонов более высокого ранга бентосных беспозвоночных [39]. Наибольшее число таксонов выявлено среди насекомых и олигохет - 70 и 14 видов соответственно.

Число видов, обнаруженных на разных участках водохранилища, изменялось в широких пределах (15–27) с минимальными значениями в истоке сбросного канала. Число видов в глубинных пробах на мягких грунтах, как правило, было ниже, чем у берега на камнях на том же участке. В зарослях макрофитов отмечено 78 видов бентосных беспозвоночных. Наибольшее число видов относится к насекомым (47) и олигохетам (13 видов).

Полученные данные по составу и структуре бентосного сообщества отличаются от результатов исследований, проведенных в 1978 и 1989 гг. [11]. В 1978 г. максимальная частота встречаемости отмечена у *Procladius ferrugineus* Kieffer. (отмечен в 93% проб), в 1989 г. этот вид был отмечен в 75% проб, а в 2002 г. – лишь в 20%. Существенно снизилась частота встречаемости и другого хищника – *Cryptochironomus gr. defectus* (в 1978 г. – 70%, 1989 г. – 30, 2002 г. – 9% проб). Широко распространены по водохранилищу на протяжении всего периода наблюдений *Chironomus gr. plumosus* (в 1978 г. - 88%,

1989 г. - 89%, 2002 г. - 31%) и *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede (81, 82 и 40%, соответственно); часто встречается и *Tubifex tubifex* Muller. (65, 97 и 33%, соответственно). Возможно, *L. hoffmeisteri* и *T. tubifex* постепенно вытесняются *L. Claparedianus* Ratzel, который в 1978 г. не был обнаружен, в 1989 г. отмечен в 13% проб, а в 2002 г. – в 33%. Значительно снизилась частота встречаемости моллюсков р. *Pisidium* (в 1978 г. - 67%, 1989 г. - 25, 2002 г. - 22%); одновременно более распространенными стали моллюски р. *Limnaea*, которые в 1978 и 1989 гг. не были обнаружены, а в 2002 г. - встречались уже в 35% проб. Наиболее распространенный в 2002 г. *Glyptotendipes glaucus* Meigen (53% проб) в 1978 г. не был отмечен, а в 1989 г. указан для 5% проб. В предыдущих исследованиях в количественных пробах не находили амфипод (в 1978 г. только на искусственном субстрате был найден *Gammarus lacustris*), в 2002 г. повсеместно встречался (на некоторых участках доминировал) *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) (40% проб). Ранее не была отмечена и поденка *Caenis horaria* (L.), встречавшаяся в 2002 г. в 29% проб.

Таким образом, данные по встречаемости отдельных видов свидетельствуют о возможной тенденции к вытеснению из бентоса хищников (*P. ferrugineus*, *C. gr. defectus*) и фильтраторов (р. *Pisidium*) детритофагами. Такое упрощение трофической структуры зообентоса может свидетельствовать о загрязнении водоема [40].

Численность и биомасса зообентоса на мягких грунтах в 1978 г. (0,3-6,2 тыс.экз./м<sup>2</sup> и 1,4-22,2 г/м<sup>2</sup>) и в 2002 г. (2,1-9,0 тыс.экз./м<sup>2</sup> и 4,7-18,1 г/м<sup>2</sup>) имели сходные значения. Существенно выше были эти показатели в 1989 г. (0,7-46,2 тыс.экз./м<sup>2</sup> и 1,0-84,6 г/м<sup>2</sup>).

Значения индекса видового разнообразия Шеннона на всех исследованных точках изменялись незначительно (1,0-2,3 бит), что соответствует умеренно-загрязненным водам. Наиболее сложная экологическая обстановка наблюдается в районе садково-рыбного хозяйства: по всем показателям этот участок характеризуется как грязный и сильно грязный. Сравнение данных 2002 г. с результатами исследований Л.В. Бажиной [11] показало, что экологическое состояние водохранилища существенно не изменилось и соответствует грязным водам в районе садково-рыбного хозяйства и умеренно загрязненным – на большей части акватории.

Анализ видового состава, особенностей пространственного распределения, динамики

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОВСКОЙ ГРЭС

количественных показателей зообентоса водоемов-охладителей позволил выявить, что в различных климатических зонах их фауна формируется преимущественно за счет аборигенных видов. Однако, при длительном тепловом воздействии стенотермные виды заменяются эвритермами. Наиболее выражена эта тенденция в высоких широтах, где доля холодноводных видов в зооценозах естественных водоемов весьма велика. Под влиянием подогрева существенно перестраивается и структура бентосных сообществ. Еще на ранних этапах изучения экосистем водоемов-охладителей анализ температурного режима позволил высказать предположение о возможности заселения их термофильными или даже тропическими видами [3]. 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, а также с длительностью существования водоема. В условиях Сибири существование таких видов возможно только в сбросном канале ГРЭС, характеризующемся максимальными температурами. Кроме того, в сбросном канале создаются неблагоприятные термические условия для аборигенных видов, что обеспечивает ослабление конкуренции для вселенцев. Этим, возможно, и объясняется массовое развитие в сбросном канале Беловской ГРЭС крупного моллюска, относящегося к тропическому роду *Potamocorbula*.

В подогреваемой зоне Беловского водохранилища отмечено увеличение количественных показателей зообентоса по сравнению с фоновой зоной, что может быть как следствием стимулирующего влияния умеренного подогрева на гидробионтов, так и отсутствием ледового покрова, что способствует улучшению кислородного режима водоема зимой. Схожие тенденции отмечены и при исследовании влияния на бентосных беспозвоночных подогретых вод Назаровской ГРЭС [41].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование биоценозов сибирских водоемов-охладителей происходит преимущественно за счет аборигенных организмов. На подогреваемых участках данных водоемов прослеживается удлинение периода и сдвиг сроков развития растений и животных, увеличение продуктивности всех трофических звеньев. Указанные элементы теплового эвтрофирования были отмечены ранее для

водоемов-охладителей Европейской части России [19, 20, 42, 43, 44, 45] и являются общезакономерными для различных типов подогреваемых водоемов умеренных широт.

На основе анализа многолетних данных по составу, структуре и функциональным характеристикам экосистемы Беловского водохранилища установлено, что постоянное и длительное (на протяжении 38 лет) действие мощного экодинамического фактора – поступления дополнительного тепла с подогретыми сбросными водами тепловой электростанции обусловило изменение не только короткопериодных характеристик – интенсивности первичного продуцирования, количества растительных и животных организмов, но и их таксономического состава – параметра с наибольшим характерным временем.

В течение последних 25-ти лет в фитопланктоне Беловского водохранилища на уровне отделов наблюдается устойчивость планктонных альгоценозов, изменения отмечены в основном на уровне таксонов более низкого ранга. По сравнению с ранними исследованиями на некоторых участках водохранилища в летне-осеннем фитопланктоне повысилась значимость синезеленых водорослей. По величинам максимальной биомассы фитопланктона и индексу сапробности качество воды водохранилища и реки Ини оценивается как удовлетворительной чистоты или загрязненная (от слабо до сильно), зона сапробности – бета- и альфамезосапробная. По уровню развития фитопланктона Беловское водохранилище классифицируется как эвтрофный водоем.

Развитие высшей водной растительности Беловского водохранилища идет по пути увеличения видового разнообразия и изменения в составе доминантного комплекса. При этом увеличились как площади зарастания отдельных частей водохранилища, так и проективное покрытие фитоценозов, что свидетельствует о продолжающемся повышении трофности водоема. Специфичность термического режима водохранилища-охладителя подчеркивается наличием в его флоре термофильных и эвритермных видов сосудистых растений (29,5%). При сохранении тех же темпов зарастания акватории водохранилища макрофитами, уменьшения прозрачности воды, а, следовательно, снижения теплообмена массы воды с атмосферой, повышения температуры воды и увеличения обилия синезеленых водорослей во все периоды года эвтрофирование водоема может пойти интенсивнее.

Анализ динамики структуры бентосного сообщества показал, что с 1978 г. произошло постепенное вытеснение из бентоса хищников и фильтраторов детритофагами. Экологическое состояние водохранилища существенно не изменилось и соответствует умеренно-загрязненному – на большей части акватории и грязным водам в районе садкового рыбного хозяйства.

Таким образом, специфические воздействия теплых вод ГРЭС на экосистему Беловского водохранилища заключаются в удлинении периода вегетации фитопланктона, появлении термофильных видов макрофитов, вытеснении детритофагами хищников в зообентосе и зоофитосе. Несмотря на значимость для сдерживания процесса эвтрофирования в сибирских водоемах региональных климатических факторов, уровень его более сходен с таковым однотипных водоемов других регионов, чем между собой. Развитие в водохранилище, расположенном на юге Западной Сибири, термофильных видов водорослей, высших водных растений и моллюсков свидетельствует о значительной роли экстраординарных локальных факторов в формировании и функционировании экосистем водоемов-охладителей тепловых электростанций и высоком адаптивном потенциале биогеоценозов умеренных широт.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Лаборатории водной экологии ИВЭП СО РАН м.н.с. М.И. Ковешникову и м.н.с. С.О. Власову за помощь в отборе проб.

*Работа выполнена при финансовой поддержке «Гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-22.2003.5», Проекта №167 Интеграционной программы СО РАН, Региональной целевой программы «Экология и природные ресурсы Кемеровской области».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экология организмов водохранилищ-охладителей // Тр. Ин-та биологии внутренних вод. - Вып. 27 (30). - Л., 1975. - 291 с.
2. Водоем-охладитель Ладыжинской ГРЭС / отв. ред. О.Г. Кафтаникова. - Киев, 1978. - 130 с.
3. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (обзор) // Труды ин-та биологии внутр. вод АН СССР. - 1978. - Вып. 27. - С. 7-69.
4. Столбунов А.К. Влияние подогретых вод ТЭС на продукционные процессы и микро-

флору водоемов-охладителей в различных зонах СССР // Водные ресурсы. - 1985. - №2. - С. 89-101

5. Кириллов В.В., Чайковская Т.С. Сравнительная характеристика экосистем водоемов-охладителей тепловых электростанций Сибири // Проблемы гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства Сибири: Тез. докл. - Ч.3. - Красноярск. - 1989. - С. 99-102.

6. Саут Р., Уиттик А. Основы альгологии. - М.: Мир, 1990. - 597 с.

7. Кириллов В.В., Чайковская Т.С. Уровень продукционно-деструкционных процессов в водоеме-охладителе Беловской ГРЭС (1977-1978 гг.) // Комплексные исследования водных ресурсов Сибири. - М., 1983. - Вып. 56. - С. 106-115.

8. Кириллов В.В., Гладкова З.И., Козлова С.В. и др. Высшая водная растительность водохранилища – охладителя Беловской ГРЭС (1978-1979 гг.) // Комплексные исследования водных ресурсов Сибири. - М., 1983. - Вып. 56. - С. 98-105.

9. Катанская В.М. Растительность водохранилищ-охладителей тепловых электростанций Советского Союза. - Л., 1979. - 278 с.

10. Кириллов В.В. Фитопланктон и первичная продукция водохранилища-охладителя Беловской ГРЭС (Кемеровская область): Автореф. дис... к.б.н. - Киев, 1986. - 26 с.

11. Степанова И.В., Бажина Л.В. Бентос Беловского водохранилища и бассейна Кадатского водохранилища // Комплексные исследования водных ресурсов Сибири. - М., 1983. - С. 116-123.

12. Кузьмин Г.В. Фитопланктон // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. - М., 1975. - С. 73-93.

13. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. - Л., 1983. - 157 с.

14. Унифицированные методы исследования качества вод, Часть 3. Методы биологического анализа вод, Приложение 2. Атлас сапробных организмов. - М., 1977. - 227 с.

15. Унифицированные методы исследования качества вод, Часть 3. Методы биологического анализа вод. - М., 1983. - 371 с.

16. Пареле Э.А. Малоцетинковые черви устьевых районов рр. Даугавы и Лиелупе, их значение в санитарно-биологической оценке. Автореф. канд. дисс.... к.б.н. - Тарту, 1975. - 24 с.

17. Попченко В.И. Оценка степени загрязнения вод по показателям зообентоса // Биоиндикация: Теория. Методы. Приложения. - Тольятти, 1994. - С. 99-106.

18. Пидгайко М.Л. Материалы к сравнительной физико-географической характеристике водоемов-охладителей электростанций Украины // Гидрохимия и гидробиология водоемов-охладителей тепловых электростанций Украины. - Киев, 1971. - С. 19-35.

19. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных станций Украины / Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др. - Киев, 1991. - 192 с.

20. Ярушина М.И., Гусева В.П., Чеботина М.Я. Видовой состав и экологическая характери-



## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОВСКОЙ ГРЭС

- стика водорослей водоема-охладителя Белоярской АЭС // Экология. – 2003. – № 1. – С. 23-29.
21. Sosnowska J. Wplyw zrzutu wod podgrzanych na fitoplankton nietorych jezior kolo Konina // Roczn.Nauk Pol., Ser. H. – 1987. – №. 101, T. 3. – S. 9-130.
22. Абакумов В.А., Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Обридко С.В. Многолетние изменения характеристик Иваньковского водохранилища // Водн. ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 3. – С. 344-356.
23. Воробьева С.С. Фитопланктон водоемов Ангары. – Новосибирск, 1995. – 126 с.
24. Чайковская Т.С. Фитопланктон реки Енисей и Красноярского водохранилища // Биологические исследования Красноярского водохранилища. – Новосибирск, 1975. – С. 43-91.
25. Паутова В.Н., Номоконова В.И., Горбунов М.Ю. Сезонная сукцессия фитопланктона в Куйбышевском водохранилище // Биология внутренних вод. – 2001. – № 3. – С. 29-35.
26. Девяткин В.Г., Митропольская И.В., Метелева Н.Ю. Динамика видовой разнообразия фитопланктона в зависимости от некоторых экологических факторов // Биология внутренних вод. – 1997. – № 2. – С. 5-12.
27. Охапкин А.Г. Динамика видовой структуры потамофитопланктона в водотоках разного типа // Биол. внутр. вод. – 2000. – № 1. – С. 53-61.
28. Кожова О.М. Формирование фитопланктона Братского водохранилища // Формирование природных условий и жизни Братского водохранилища. – М., 1970. – С. 26-171.
29. Ляшенко О.А. Сезонная динамика и многолетние изменения фитопланктона и содержания хлорофилла в Угличском водохранилище // Биология внутренних вод. – 2000. – № 3. – С. 52-61.
30. Жукинский В.Н., Оксий О.П. Экологическая классификация качества поверхностных вод суши по их составу и свойствам // Инф. Бюлл. По водному хоз-ву. – 1984. – Вып. 2, № 34. – С. 71-76.
31. Экологические проблемы Верхней Волги. – Ярославль, 2001. – 427 с.
32. Биология Воткинского водохранилища. – Иркутск, 1988. – 184 с.
33. Волобаев П.А. О формировании термофильного элемента флоры макрофитов водохранилища-охладителя Южно-Кузбасской ГРЭС Деп. ВИНТИ. – Кемерово, 1989. – № 7410-В89.
34. Безносоева В.Н., Суздалева А.Л. Экзотические виды фитобентоса и зообентоса водоемов-охладителей АЭС как биоиндикаторы теплового загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология. – 2001. – №3. – С. 22-23.
35. Шахматова Р.А., Тухсанова Н.Г., Юлова Г.А. Биологическая характеристика термального водоема ГоГЭС им. А.В. Винтера // Смп. по влиянию подогретых вод теплоэлектростанций на гидрологию и биологию водоемов: Тез. докл. – Борок, 1971. – С. 62-64.
36. Ваулин Г.Н., Зубарева Э.Л. Валлиснерия в Верхне-Тагильском водоеме-охладителе // Структура и функции водных биоценозов, их рациональное использование и охрана вод на Урале. – Свердловск, 1979. – С. 23-24.
37. Журавель П.А. К экологии теплолюбивых гидробионтов в водоемах с теплыми водами ГРЭС Днепропетровской области // Влияние тепловых электростанций на гидрологию и биологию водоемов. – Борок, 1974. – С. 65-67.
38. Лукина Л. Ф., Смирнова Н. Н. Физиология высших водных растений. – Киев, 1988. – 270 с.
39. Яныгина Л.В., Крылова Е.Н., Ковешников М.И. Многолетние изменения трофической структуры зообентоса Беловского водохранилища // Трофические связи в водных сообществах и экосистемах: Мат. конф. – Борок, 2003 – С.145.
40. Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. – Л., 1989. – 150 с.
41. Бажина Л.В. Зообентос и качество вод р. Чулым в районе г. Назарово и Назаровской ГРЭС // Вопросы охраны природной среды: Тр. ЗапСибНИИ Госкомгидромета. – М., 1984. – Вып. 62. – С. 16-19.
42. Владимиров М.З., Тодераш И.К. Качественный состав и количественное развитие макрозообентоса // Биопродукционные процессы в водохранилищах-охладителях ТЭС. – Кишинев, 1988. – С. 130-138.
43. Калиниченко Р.А., Сергеева О.А., Протасов А.А., Синецына О.О. Структура и функциональные характеристики пелагических и контурных группировок гидробионтов в водоеме-охладителе Запорожской АЭС // Гидробиол. журн. – 1998. – Т. 34., №1. – С. 15-25.
44. Леонов С.В., Чионов В.Г., Шилькрот Г.С., Ясинский С.В. Формирование качества воды водоема-охладителя // Водные ресурсы. – Т. 27, №4. – 2000. – С. 477-484.
45. Безносоева В.Н., Кучкина М.А., Суздалева А.Л. Исследование процесса термического евтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водн. ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 5. – С. 610-615.