

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАКОПИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Чеботина М.Я., Гусева В.П. – Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

Поляков Е.В. – Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В работе приводятся результаты многолетних наблюдений (1986–2011) за состоянием зоопланктонного комплекса и его способностью поглощать радионуклиды и микроэлементы из воды Белоярского водохранилища на Среднем Урале. Рассмотрено влияние различных экологических факторов, определяющих накопление радиоактивных и химических поллютантов зоопланктонными организмами.

Атомная станция, зоопланктон, видовой состав, численность, биомасса, радионуклиды, микроэлементы.

ZOOPLANKTON OF THE COOLING RESERVOIR OF THE BELOYARSKAYA ATOMIC POWER STATION: SPECIES CHARACTERISTICS AND ACCUMULATIVE ABILITY

Chebotina M.Ya., Guseva V.P. – Institute of Plant and Animal Ecology UB of RAS, Yekaterinburg

Polyakov E.V. – Institute of Solid State Chemistry UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The paper gives the results of many-year (1986–2011) observations on the state of zooplankton complex and its ability to absorb radionuclides and microelements from the water of the BNPS cooling pond. The effects of various ecological factors on the accumulation of radioactive and chemical pollutants in zooplankton organisms are reported.

Nuclear power station, zooplankton, species composition, abundance, biomass, radionuclides, microelements

Атомные электростанции относятся к числу крупных промышленных объектов, оказывающих воздействие на окружающую природную среду. Водные резервуары в районах функционирования атомных электростанций зачастую служат водоемами-охладителями АЭС и поэтому в той или иной степени подвергаются воздействию стоков этих предприятий. При нормальном режиме работы воздействие АЭС на водные экосистемы проявляется за счет влияния преимущественно трех факторов – радиационного, химического и теплового. Воздействие радиационного фактора сводится к тому, что в водоемы-охладители в небольших количествах поступают слабо-радиоактивные вещества, которые в силу специфики водных экосистем быстро поглощаются гидробионтами и донными отложениями. В зонах сброса слабо-радиоактивных стоков действие радиационного фактора часто проявляется на фоне подогрева воды и механического травмирования мелких гидробионтов. АЭС могут так-

же быть источником химического загрязнения водоемов-охладителей, обусловленного технологическими процессами и разными вспомогательными строительными работами на АЭС. Все перечисленные выше факторы в совокупности могут снижать общую резистентность водных организмов и приводить к различным синергическим эффектам (Чеботина и др., 1992; Егоров, 2007).

Оценка совокупного воздействия различных факторов с учетом их малых доз может быть выполнена методами биоиндикационного анализа, основанного на изменениях структурных характеристик сообществ гидробионтов в водоеме (Крылов, 2012; Пашкова, 2012).

Важным компонентом водного биоценоза является зоопланктон, насчитывающий большое число видов мелких животных организмов, состав которых быстро меняется в зависимости от различных экологических факторов – температуры, режима освещения, времени суток, сезона

года, местообитания, химического состава воды и т.д. Зоопланктон обладает большой суммарной сорбционной поверхностью, поэтому способен быстро адсорбировать поступающие в водную среду радионуклиды и химические элементы, в связи с чем может служить хорошим индикатором загрязнения водной экосистемы в районах АЭС (Чеботина и др., 2002). Имеющаяся в литературе информация касается в основном анализа биоразнообразия зоопланктонных организмов в зависимости от различных экологических факторов водной среды. Однако вопросы накопления радиоактивных и химических загрязнителей этими гидробионтами до настоящего времени остаются недостаточно изученными.

В данном сообщении приводятся результаты многолетних исследований (1986–2011) состояния зоопланктонного комплекса в водоеме-охладителе Белоярской АЭС на Среднем Урале.

Объекты и методы

Объектом исследования служил зоопланктон Белоярского водохранилища – искусственного водоема, образованного в 1959–1963 гг. путем зарегулирования русла р. Пышмы в 75 км от истока. Река относится к Обь–Иртышскому бассейну и является правым притоком р. Туры, впадающей в р. Тобол – приток Иртыша. Вытекает река из оз. Ключевского, расположенного на массиве Молебского болота, вблизи г. Верхняя Пышма. Общая протяженность реки – 626 км, площадь водосбора – 19400 км². Скорость течения в межень составляет 0,5–0,7 м/с, ширина в верховье колеблется в пределах 8–10 м, а ближе к устью – 60–100 м.

Белоярское водохранилище используется в качестве водоема-охладителя Белоярской атомной электростанции (БАЭС) – первой крупной промышленной АЭС в мире. Станция пущена в эксплуатацию в 1964 г. Первая очередь БАЭС с уранграфитовыми реакторами канального типа АМБ-100 и АМБ-200 состояла из 1-го и 2-го энергоблоков. 1-й блок выведен из эксплуатации в 1981 г., 2-й проработал с 1967 по 1989 г. В 1980 г. был пущен 3-й энерго-

блок на быстрых нейтронах корпусного типа с жидкометаллическим теплоносителем (БН-600), который работает и в настоящее время. Заканчивается строительство 4-го энергоблока.

Видовой состав растений исследуемого водоема представлен следующими видами: водоросли – кладофора (*Cladophora fracta* Kütz., *C. glomerata* (L.) Kütz), спирогира (*Spirogira sp.*), водная сеточка (*Hydrodictyon reticulatum* Lagerch); высшие растения, из них погруженные: элодея канадская (*Elodea canadensis* Rich.), роголистник темнозеленый (*Ceratophyllum demersum* L.), уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum* L.), рдесты пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), сплюснутый (*P. compressus* L.), гребенчатый (*P. pectinatus* L.), курчавый (*P. Crispus* L.), плавающий (*P. natans* L.), блестящий (*P. lucens* L.), лютик жестколистный (*Ranunculus circinatus* Sibth), телорез обыкновенный (*Stratiotes aloides* L.); растения, плавающие на поверхности: ряска малая (*Lemna minor* L.), ряска трехраздельная (*L. trisulca* L.), водокрас обыкновенный (*Hydrocharis morsus ranae* L.); прибрежно-водные растения: частуха подорожниковая (*Alisma plantagoaquatica* L.), рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), вех ядовитый (*Cicuta palustris* L.), белокрыльник болотный (*Calla palustris* L.), камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), череда трехраздельная (*Bidens tripartita* L.), хвощ иловатый (*Equisetum limosum* L.), щавель конский (*Rumex confertus* Willd), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin), гравилат речной (*Geum rivale* L.), осока (*Carex sp.*).

В месте сброса подогретых вод зарегистрировано девять видов растений (*Cladophora glomerata*, *C. fracta*, *Spirogira sp.*, *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum*, *Lemna minor*, *Potamogeton pectinatus*, *Typha latifolia*, *Carex sp.*). К 1986 г. появились *P. lucens*, *Hydrocharis morsus ranae*. Увеличилось обилие *C. demersum*, *L. minor*, сократилось количество *E. canadensis*.

Ихтиофауна водоема представлена в основном плотвой (*Rutilus rutilus* Pall.), ле-

щом (*Abramis brama* L.), щукой (*Esox lucius* L.), карпом (*Cyprinus carpio* L.), реже встречаются окунь (*Perca fluviatilis* L.), линь (*Tinca tinca* L.), карась (*Carassius auratus gibelii* Bloch.), судак (*Lucioperca lucioperca* L.) и др. (Трапезников и др., 2008).

Среди фитопланктонных организмов по числу видов преобладают зеленые водоросли (хлорококковые, десмидиевые, вольвоксовые), менее распространены диатомовые, синезеленые, эвгленовые, динофитовые, криптофитовые и другие отделы. В составе зоопланктона основную массу составляют ракообразные (веслоногие и ветвистоусые рачки), меньше численность коловраток.

Донные отложения Белоярского водохранилища преимущественно илистые, в меньшей степени распространены затопленная почва, песчано-илистый, илисто-песчаный и песчаный грунты. Для мелководной береговой зоны наиболее характерен песчаный грунт, а дно водоема в глубоководной части покрыто в основном илистым сапропелем.

В настоящее время водоем можно характеризовать как гидрокарбонатно-кальциевый со средней степенью минерализации и нормальным кислородным режимом. Наличие зоны с повышенной температурой воды и слабощелочная реакция среды создают благоприятные условия для обитания рыб и других гидробионтов.

Для определения видового состава, численности и биомассы зоопланктона его отлавливали сачком (типа Апштейна), изготовленным из мельничного газа № 70, и консервировали 40%-ным раствором формалина. Пробу переносили в чашку Петри и под бинокулярной лупой определяли видовой состав зоопланктонных организмов. Численность каждого вида зоопланктона определяли в камере Богорова под бинокулярной лупой. Для измерения биомассы вычисляли средний размер отдельно самок и самцов каждого вида; для молоди выполняли расчеты отдельно. Биомассу зоопланктонных организмов вычисляли по таблицам пересчета длины тела на сырой

вес одного экземпляра (Мануйлова, 1964; Кутикова, 1970; Определитель..., 1995).

Для определения содержания радионуклидов в зоопланктоне его отбирали методом трала с лодки из слоя воды 0–1,5 м от поверхности при помощи сачков, изготовленных из мельничного газа № 21. После сцеживания воды сырую массу планктона взвешивали, высушивали и озоляли в муфельной печи при температуре 450 °С. Содержание ^{137}Cs в пробах определяли с помощью сцинтилляционного γ -спектрометра с использованием программного обеспечения «Прогресс».

^{90}Sr в пробах золы определяли радиохимическим методом. Радиометрию полученных осадков производили на малофоновой установке УМФ-2000. Ошибка счета не превышала 10–15 %.

В процессе подготовки проб зоопланктона для анализа на содержание микроэлементов их растирали на электромельнице до порошкообразного состояния. Усредненные пробы растворяли в смеси азотной, соляной и фтороводородной кислот в соотношении 2:1:1 и выдерживали в автоклаве 15–30 мин при температуре 150–160 °С с последующим прокаливанием. Количественное определение элементов производили

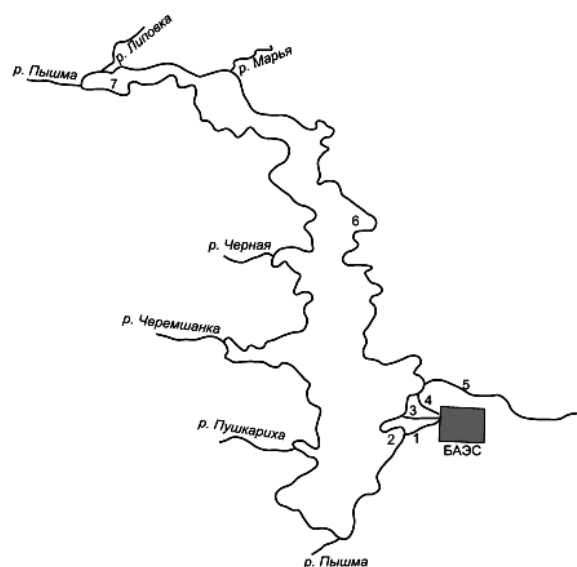


Рис. 1. Схема Белоярского водохранилища. 1 – водосбросной (теплый) канал; 2 – Теплый залив; 3 – водозаборный канал; 4 – промливневый канал; 5 – обводной канал; 6 – Щучий залив; 7 – верховье водоема

дили на квадрупольном масс-спектрометре Perkin-Elmer SCIEX (США–Канада) с использованием калибровочного стандартного раствора с требуемым диапазоном концентраций исследуемых элементов.

Относительная стандартная погрешность определений не превышала 10–20 %. Все данные рассчитаны на сухую массу планктона.

Схема Белоярского водохранилища и расположение точек отбора проб на нем приведены на рис. 1. Нами были исследованы видовой состав, динамика численности и биомассы, накопительная способность зоопланктона в зоне сброса подогретых вод, каналах, центральной акватории водоема и контрольном регионе.

Результаты и их обсуждение

Видовой состав, динамика численности и биомассы зоопланктона в разных районах водоема-охладителя

Зона сброса подогретой воды и контрольный район. Температура водной среды является важным абиотическим фактором, оказывающим большое влияние на структуру экосистемы и процессы метаболизма обитающих организмов. В зоне сброса подогретой воды изменяются гидрохимические и гидробиологические показатели воды: возрастает концентрация органических веществ, увеличивается расход кислорода на их окисление, в результате чего концентрация кислорода в воде снижается. Изменяется концентрация биогенных элементов и минерализация воды (Суздалева, Безносков, 2000; Егоров и др., 2001; Вицбискас, 2002).

Изменение температурных условий вызывает изменение состава, структуры и других характеристик водного гидробиоценоза, что проявляется в снижении в каждой экологической группе численности холодолюбивых видов, полном или частичном исчезновении некоторых из них, переселении их в малообогреваемые участки водоема, адаптации некоторых из них к новым условиям обитания. Изменяются соотношения числа видов-индикаторов сапробности в составе зоопланктонных организмов. Вследствие подогрева воды часто сокраща-

ются численность и видовое разнообразие зоопланктонных сообществ, а основой зоопланктона становятся эвритермные и эврибионтные виды (Пашкова, 2009; Протасов и др., 2011).

Для оценки влияния сброса подогретой воды на видовой состав, численность и биомассу зоопланктона проводили исследования в двух ключевых точках – Теплом и Щучьем заливах водоема-охладителя (последний располагается примерно в 7 км вверх по течению от места сброса теплой воды). Численность зоопланктона в разные периоды наблюдений в Теплом заливе варьировала от 14 до 107 тыс. экз/м³, а в Щучьем – от 18 до 328 тыс. экз/м³; биомасса изменялась соответственно в пределах 0,4–2,4 и 1,2–25,8 г/м³. В среднем численность зоопланктона в Щучьем заливе была примерно в 4 раза, а биомасса в 7 раз выше, чем в Теплом заливе (рис. 2).

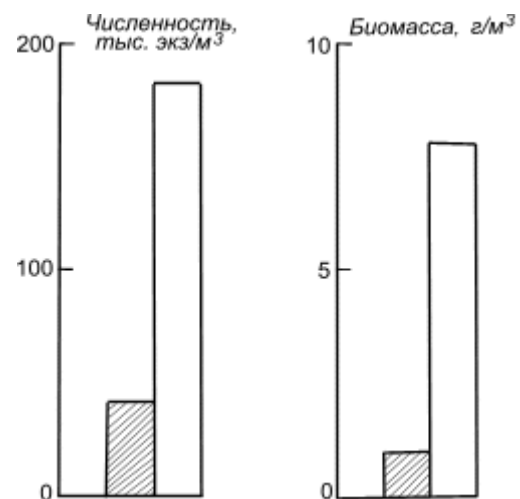


Рис. 2. Усредненные значения общей численности и биомассы зоопланктона в Теплом (темные столбики) и Щучьем (светлые столбики) заливах Белоярского водохранилища

Статистическая обработка результатов по критерию *t* позволила выявить достоверные различия (при 5 %-ном уровне значимости) в численности и биомассе зоопланктона двух обследуемых акваторий водоема-охладителя. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в Теплом заливе, принимающем подогретые сбросные воды Белоярской АЭС, наблюдается явное

угнетение зоопланктона, проявляющееся в снижении его численности и биомассы по сравнению с Щучьим заливом, куда подогретые воды не поступают. Аналогичные выводы, свидетельствующие о связи численности зоопланктона и температуры водной среды, следуют из работ других авторов (Макаревич, Ишкулов, 2010).

В обоих регионах как по численности, так и по биомассе ракообразные заметно преобладали над коловратками. Так в зоне сброса подогретых вод численность ракообразных в среднем по всем временным точкам составляла 25, а коловраток – 7 тыс. экз/м³; биомасса этих гидробионтов составляла соответственно 1,1 и 0,01 г/м³. В Щучьем заливе средняя численность ракообразных составляла 109, коловраток 15 тыс. экз/м³, а их биомасса – 8 и 0,07 г/м³ соответственно. Значительная доля численности зоопланктона приходилась на молодь ракообразных, которая в разное время наблюдений составляла от 4 до 88 % от общей численности зоопланктона. Как правило, в зоне сброса подогретых вод численность молодежи была заметно ниже, чем в Щучьем заливе.

В целом, среди доминирующих видов в обоих регионах чаще всего преобладают ветвистоусые рачки *Daphnia pulex*. Среди других видов в разные сроки наблюдений по биомассе доминировали *Eudiaptomus graciloides*, *D. cristata*, *Bosmina kessleri*, *Chydorus sphaericus*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Cyclops vicinus*.

Численность и биомасса доминирующих видов в водоеме характеризуется заметной вариабельностью и зависит от многих факторов, в том числе от сезона года, температуры водной среды, района исследований и др. В частности, замечено, что в Теплом заливе в один из периодов наблюдений при температуре воды 20 °С преобладали (в процентах от общей биомассы зоопланктона) ветвистоусые рачки *D. pulex* (71), а при 30 °С встречались преимущественно другие виды ветвистоусых: *D. cristata* (31), *B. kessleri* (23) и *Ch. sphaericus* (22). В Щучьем заливе в это же время исследований при температуре 16 °С преобладали *D. pulex* (49) и *D. cristata* (20), а при

26 °С – *D. pulex* (32), *D. brachyurum* (28) и *D. cristata* (25).

При одной и той же температуре воды в разные летние месяцы состав преобладающих видов зоопланктона также изменялся. Например, в Теплом заливе при 29,5 °С в июле преобладали *D. pulex* (63) и *Eud. graciloides* (27), а в августе при этой же температуре здесь преобладали *D. cristata* (31), *B. kessleri* (23) и *Ch. sphaericus* (22). В Щучьем заливе при одинаковой температуре воды 20 °С в июне и августе состав доминирующего комплекса различался соответственно – *Eud. graciloides* (47), *D. cristata* (32) и *Ch. sphaericus* (35), *D. brachyurum* (29), *D. cristata* (23). При одинаковой температуре (19 °С) в Теплом заливе наблюдали один доминирующий вид – *D. pulex* (71), а в Щучьем в это же время их было два – *D. pulex* (41) и *D. cristata* (42). Таким образом, доминирующие виды по показателю биомассы в исследованных акваториях водоема-охладителя заметно различались между собой.

Отмеченные выше различия в численности и биомассе всего сообщества зоопланктонных организмов в Теплом и Щучьем заливах прослеживались также по численности и биомассе ведущих форм зоопланктона. В частности, численность и биомасса *D. pulex* и *D. cristata* были выше в 8–10 раз, а *Eud. graciloides* – в 6 раз в Щучьем заливе по сравнению с зоной подогрева. Подчеркнем, что зоопланктон является более чувствительным объектом по отношению к температурному фактору по сравнению с фитопланктоном (Чеботина, Гусева, 2006).

Водозаборный и водосбросной каналы.

К числу важных факторов воздействия АЭС на состояние экосистем водоемов-охладителей можно отнести травмирование мелких гидробионтов при прохождении воды через заградительные решетки перед входом в насосы станции. Забираемая в системы охлаждения вода вместе с планктоном подвергается действию значительного давления в насосах и высоких скоростей в трубках конденсатора и на водосбросе, а также в открытой части водо-

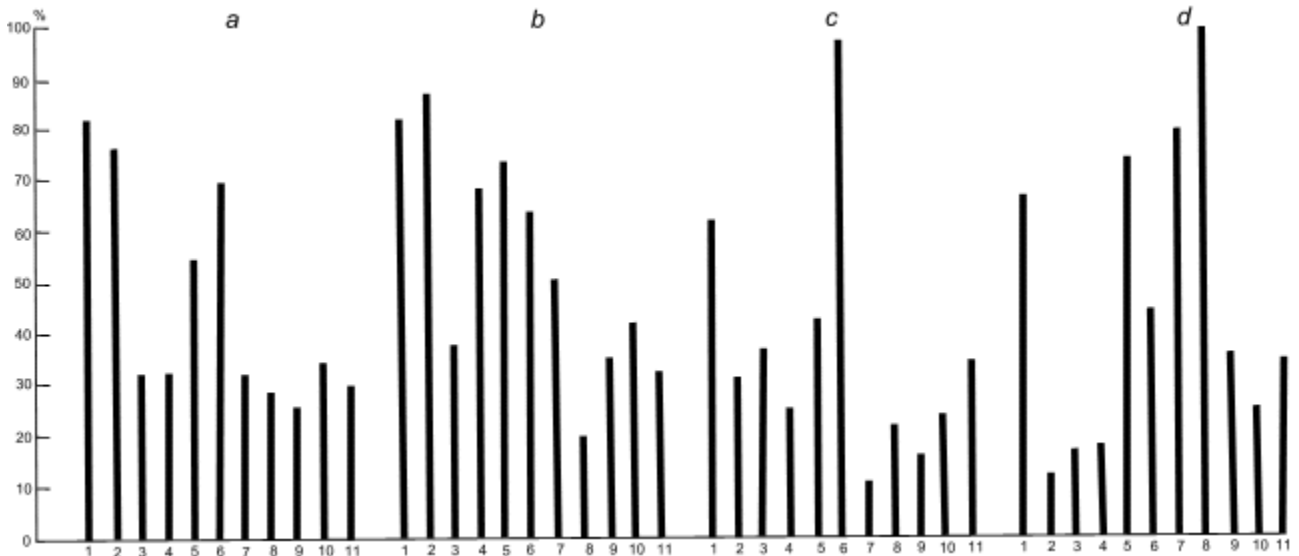


Рис. 3. Численность общего зоопланктона (а), ветвистоусых (б) и веслоногих (в) рачков и коловраток (г) в водосбросном канале (% от соответствующих показателей в водозаборном канале). 1 – 11 – временные точки отбора (1 – 06.1987; 2 – 07.1987; 3 – 08.1987; 4 – 10.07.1990; 5 – 17.07.1990; 6 – 24.07.1990; 7 – 31.07.1990; 8 – 9.07.1990; 9 – 16.07.1991; 10 – 23.07.1991; 11 – 30.07.1991)

сбросного канала. Несмотря на кратковременность пребывания воды в пределах электростанции (около 8 мин), организмы, находящиеся в забираемой воде, подвергаются механическому травмированию и одновременно тепловому шоку от быстрого повышения температуры (до 90 °С). Кроме того, вода перед поступлением в охлаждающую систему подвергается хлорированию в целях предотвращения бактериального и грибкового обрастания внутренней поверх-

ности трубок (Мордухай-Болтовской, 1975).

Результаты исследования до и после прохождения воды через системы охлаждения показали, что зоопланктон водозаборного и водосбросного каналов насчитывал соответственно 17 и 16 видов. Можно считать, что прохождение воды через системы охлаждения АЭС практически не сказалось на общем количестве видов зоопланктонных организмов.

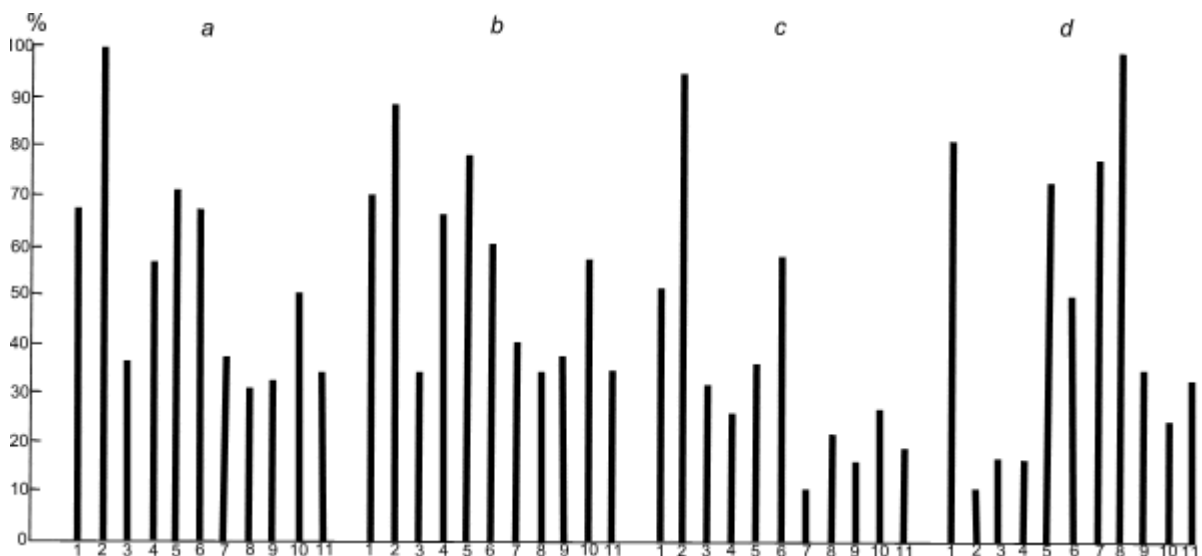


Рис. 4. Биомасса общего зоопланктона (а), ветвистоусых (б) и веслоногих (в) рачков и коловраток (г) в водосбросном канале (% от соответствующих показателей в водозаборном канале). 1 – 11 – временные точки отбора (см. рис. 3)

Численность и биомасса зоопланктона заметно снижаются после прохождения через охладительные агрегаты станции как по средним показателям для суммарного зоопланктона (в 3 и 2 раза соответственно), так и для отдельных его классов. Указанные различия проявляются и в разные годы наблюдений (рис. 3, 4).

Обработка результатов с помощью критерия t позволила выявить высокодостоверные различия (уровень значимости 0,02) по чувствительности к повреждающим факторам между веслоногими и ветвистоусыми рачками: снижение биомассы у первых из них (в среднем на 71 %) при прохождении через охладительную систему было достоверно выше, чем у вторых (в среднем на 48 %). В то же время сравнение ракообразных (снижение биомассы в среднем на 53 %) с их молодью (в среднем на 73 %), а также ракообразных с коловратками (в среднем на 53 %) по критерию снижения биомассы не выявило между ними достоверных различий.

Доминирующий комплекс зоопланктона в период исследований в районе водозаборного и водосбросного каналов был представлен веслоногими (*Eud. graciloides*) и ветвистоусыми (*D. cristata*, *D. cucullata*, *D. pulex*, *D. brachyurum*, *B. longirostris*) рачками. Отмечены статистически достоверные различия (при уровне значимости $< 0,02$) в снижении биомассы при прохождении через систему охлаждения двух наиболее распространенных в данном регионе видов веслоногих (*E. graciloides*, убыль биомассы 72 ± 6 %) и ветвистоусых (*D. cristata*, убыль биомассы 40 ± 9 %) рачков. Кроме того, наблюдались высокодостоверные различия (при уровне значимости $< 0,02$) в убыли биомассы между веслоногим рачком *Eud. graciloides* и совокупностью доминирующих видов ветвистоусых (*D. cristata*, *D. cucullata*, *D. pulex*, *D. brachyurum*, *B. longirostris*). В последнем случае убыль биомассы составляла 49 ± 4 % от суммарной биомассы этих видов.

Таким образом, анализ гибели доминирующих видов после прохождения их че-

рез охлаждающую систему АЭС подтвердил вывод о большей чувствительности к повреждающим факторам веслоногих рачков по сравнению с ветвистоусыми.

Рассчитано, что через водозаборный канал засасывается с водой примерно 11 т/сут зоопланктонных организмов. Примерно 45 % (5 т/сут) зоопланктона выходит обратно в водоем через водосбросной канал без видимых повреждений. Остальные 55 % организмов (6 т/сут) погибают.

Таким образом, в летне-осенний период за счет работы систем охлаждения АЭС дополнительно погибает примерно 720 т зоопланктонных организмов.

Промливневый канал. Частичное поступление жидких стоков в водохранилище от атомной станции осуществляется через промливневый канал (ПЛК). В канал поступают стоки с территории станции (воды спецпрачечных, душевых, талые и ливневые воды) и соседнего предприятия Института ядерных материалов, где работает экспериментальный реактор (Колтик, 2001). В процессе исследований в указанном канале было обнаружено 9 видов зоопланктона, тогда как в верховье водоема – 22 вида. Численность и биомасса зоопланктона в районе ПЛК была заметно ниже по сравнению с верховьем водоема, расположенным вверх по течению примерно в 15 км от АЭС. Последнее свидетельствует об угнетении этой группы гидробионтов сбросными водами промливневой канализации, что хорошо демонстрирует рис. 5. Район верховья, получающий

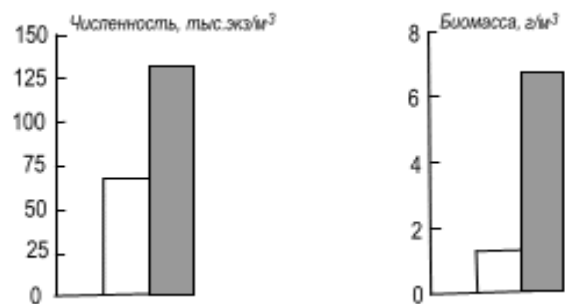


Рис. 5. Общая численность и биомасса зоопланктона в ПЛК (светлые столбики) и верховье (темные столбики) Белоярского водохранилища

Таблица . Численность (тыс. экз/м³) и биомасса (г/м³) основных групп зоопланктонных организмов в районе ПЛК и верховья водоема

Показатель	Численность		Биомасса	
	Район ПЛК	Верховье	Район ПЛК	Верховье
Ракообразные:				
ветвистоусые	3,4	51,3	0,38	3,36
веслоногие	23,4	60,3	0,88	3,24
Коловратки	38,4	19,9	0,02	0,09

дополнительные количества питательных веществ с водами р. Пышмы, более благоприятен для развития зоопланктона, чем промливневый канал.

По составу зоопланктона исследуемые местообитания также различались. В верховье водоема биомасса зоопланктона была представлена преимущественно ветвистоусыми и веслоногими рачками в одинаковой пропорции, тогда как в ПЛК ветвистоусых было в 2 раза меньше, чем веслоногих (таблица). Различались и доминирующие виды зоопланктона. По численности в момент исследований в районе верховья преобладал ветвистоусый рачок *B. kessleri* (12,6 % от общей численности зоопланктона), *B. obtusirostris* (8,5 %), *D. brachyurum* (10 %) и веслоногий рачок *Macrocyclus albidus* (7,8 %), а также коловратка *Keratella quadrata* (8,1 %). В районе ПЛК преобладали коловратки – *K. quadrata* (29,8 %) и *K. cochlearis* (21,6 %). По биомассе в верховье доминировал веслоногий *M. albidus* (38 % от общей биомассы зоопланктона) и ветвистоусый *B. obtusirostris* (23 %) рачки, а в ПЛК – веслоногие рачки *Eucyclops serrulatus* (37 %) и *Eud. graciloides* (28 %) и ветвистоусый рачок *Leptodora kindtii* (21 %).

Центральная акватория водоема. Численность зоопланктона в центральной акватории водоема в разные периоды наблюдений изменялась от 19 до 471 тыс. экз/м³ при средних значениях примерно 131 тыс. экз/м³, а биомасса – от 0,3 до 19 г/м³, в среднем около 5 г/м³. Как и в других заливах водоема-охладителя, здесь ракообразные в большинстве случаев значительно преобладали над коловратками. Отмечено большое количество молоди ракообразных (от 5 до 82 % от общей численности зоопланктона в зави-

симости от срока и места наблюдений), в то время как по биомассе молодь составляла всего 0,1–5 %.

В процессе проведения исследований центральная акватория водохранилища была поделена на три зоны – верхнюю, среднюю и нижнюю. Во всех зонах численность и биомасса зоопланктона в периоды наибольшего прогрева воды (июль) были выше, чем в более холодное осеннее время. Отмечена наиболее высокая численность и биомасса зоопланктона в верхней части водоема по сравнению с нижней. В частности, в разное время наблюдений биомасса зоопланктона в верховье была примерно в 5–10 раз выше, чем в средней и нижней частях. Указанные различия между верхней и нижней частями водохранилища, очевидно, связаны с воздействием р. Пышмы, приносящей в верховье водоема со сточными водами городов Екатеринбург, Березовского, Верхней Пышмы дополнительные количества химических элементов и органических веществ и таким способом стимулирующей развитие здесь планктонных организмов и высшей водной растительности.

Общий список видов зоопланктона водоема-охладителя. Ниже приведен общий список зоопланктонных организмов, зарегистрированных в Белоярском водохранилище в период исследований, насчитывающий 31 вид:

Класс Ракообразные

Ветвистоусые

Alona rectangula Müll.

Bosmina kessleri Uljan.

Bosmina longirostris Müll.

Bosmina obtusirostris Sars.

Bythotrephes longimanus Leydig.

Ceriodaphnia quadrangula Müll.
Chydorus sphaericus Müll.
Daphnia cristata Sars.
Daphnia cucullata Sars.
Daphnia pulex Leydig.
Diaphanosoma brachyurum Liev.
Leptodora Kindtii Focke.
Sida crystallina Müll.

Веслоногие

Acanthocyclops viridis Jur.
Cyclops vicinus Uljan.
Eucyclops serrulatus Fisch.
Eudiaptomus graciloides Lill.
Macrocyclops albidus Jur.

Класс Коловратки

Asplanchna priodonta Gosse.
Brachionus budapestiensis Daday.
Brachionus diversicornis Daday.
Brachionus quadridentatus Herm.
Conochilus unicornis Rouss.
Filinia longiseta Ehren.
Kellicottia longispina Kell
Keratella cochlearis Gosse.
Keratella quadrata Müll.
Lecane (Monostyla) luna Müll.
Microcodon claus Ehrbg.
Notholca squamula Müll.
Platyas quadricornis Ehrbg.

Накопление радионуклидов и микроэлементов

Изучение процессов накопления радиоактивных и стабильных элементов зоопланктоном имеет практическое значение в связи с тем, что он служит пищей для рыб и является важным звеном пищевой цепочки, ведущей к человеку. Кроме того, зоопланктон участвует в формировании потока осадочных веществ из воды в донные отложения и тем самым способствует очищению водной толщи от радиоактивных и химических загрязнителей (Куликов, Чеботина, 1988).

В данном исследовании основное внимание было уделено промливневому каналу, наиболее подверженному воздействию слаборадиоактивных стоков АЭС. Оценка концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в зоопланктоне устьевой части ПЛК в период работы третьего энергоблока показала, что уровни

накопления ^{137}Cs в нем значительно выше, чем ^{90}Sr . В частности, содержание ^{90}Sr в этот период исследований варьировало от 83 до 224 Бк/кг сухой массы при среднем значении 139 ± 17 Бк/кг, а ^{137}Cs – от 2500 до 4600 Бк/кг (среднее значение 3250 ± 250 Бк/кг). Для сравнения: концентрация ^{90}Sr в зоопланктоне Щучьего залива, расположенного на расстоянии примерно 7 км в сторону верховья, составило в среднем $5,3 \pm 1,1$ Бк/кг, а ^{137}Cs – 7,3 Бк/кг. Эти данные свидетельствуют о заметном поступлении исследуемых радионуклидов в водоем через промливневую канализацию АЭС.

Поскольку считается, что основным депо накопления радионуклидов в водоеме являются грунты (Куликов, Чеботина, 1988), интересно было сравнить накопительную способность грунта, фито- и зоопланктона, а также других групп гидробионтов, отобранных в промливневом канале. Концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде данной акватории в течение всего периода исследований незначительно варьировала вокруг средних величин (^{90}Sr – 0,018 Бк/л, ^{137}Cs – 0,016 Бк/л). На основе этих данных были рассчитаны коэффициенты накопления исследуемых радионуклидов для фито- и зоопланктонных организмов, грунта, некоторых видов рыб (мальков) и моллюсков (коэффициент накопления КН представляет собой отношение концентрации радио-

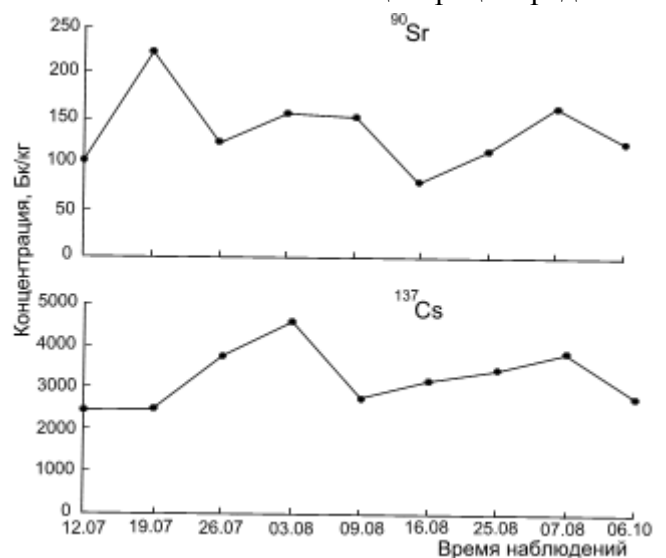


Рис. 6. Динамика изменения концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в зоопланктоне устьевой части ПЛК в разные месяцы наблюдений

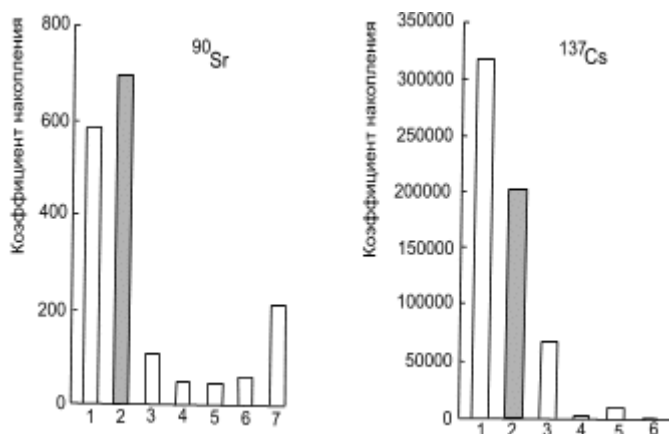


Рис. 7. Сравнительные коэффициенты накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs для гидробионтов и грунта устьевой части ПЛК. 1 – фитопланктон; 2 – зоопланктон; 3 – грунт; 4 – чебак; 5 – вьюн; 6 – подлещик; 7 – двустворчатые моллюски

нуклида в гидробионтах и грунтах к их концентрации в воде).

Видно (рис. 6), что на момент исследований КН ^{90}Sr для грунта ПЛК был равен 1100, а для фито- и зоопланктона – 6–7 раз больше (соответственно 5850 и 6960). Коэффициенты накопления у фито- и зоопланктона также выше, чем у мальков рыб (470–620) и моллюсков (2120).

Аналогичная картина наблюдалась и по ^{137}Cs : для фитопланктона КН (318620) был в 5, а для зоопланктона (203190) – в 3 раза больше, чем для грунта (64060). У мальков рыб они были меньше и изменя-

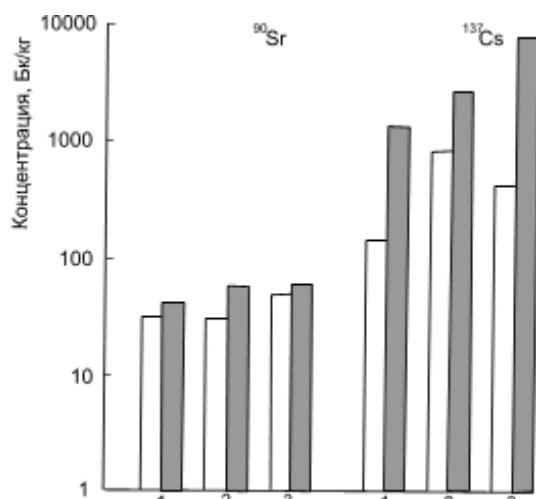


Рис. 8. Концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в зоопланктоне в проливневых каналах АЭС (темные столбики) и ИЯМ (светлые столбики) в разные стоки наблюдений (1–3). 1 – 20.06.05; 2 – 27.06.05; 3 – 4.07.05

лись в пределах 2170–9200. Для моллюсков коэффициенты накопления этого радионуклида определить не удалось, так как его концентрация находилась ниже предела обнаружения (рис. 7).

В ПЛК поступают стоки из двух каналов – от АЭС и Института ядерных материалов (ИЯМ). Нами был оценен вклад каждого из указанных выше предприятий в загрязнение зоопланктона ПЛК ^{90}Sr и ^{137}Cs (рис. 8). Установлено, что концентрации исследованных радионуклидов, особенно ^{137}Cs , в зоопланктоне канала АЭС выше, чем в канале ИЯМ.

В специальном исследовании была оце-

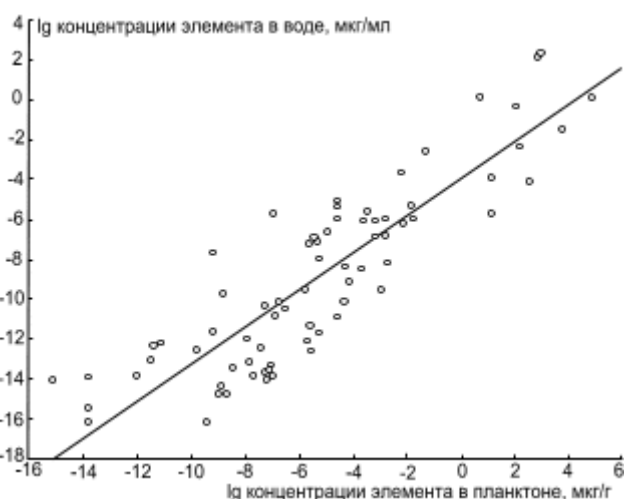


Рис. 9. Корреляционная связь между концентрациями химических элементов в зоопланктоне и водной среде

нена накопительная способность зоопланктонных организмов в отношении 70-ти различных химических элементов, большинство из которых находится в водной среде в микро количествах.

Установлено, что их концентрации в зависимости от химической природы варьируют в пределах 10 порядков величин.

Наиболее высокие значения отмечены для Si ($10^5 - 10^6$ мкг/г сухой массы), Mg, Al, Ca, Mn, Fe ($10^4 - 10^5$ мкг/г). По мере снижения концентраций идут ряды: Na, P, K, Ti ($10^3 - 10^4$ мкг/г), Sc, V, Ni, Cu, Br, Sr, Nb, Ba, Pb ($10^2 - 10^3$ мкг/г), Li, B, Co, Cr, Zn, Ga, As, Se, Rb, Zr, Y, Ag, Sn, Sb, La, Ce, Ta, W, Hg, U ($10 - 10^2$ мкг/г), Be, Mo, Cd, I, Cs, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb, Hf, Bi, Th (1 –

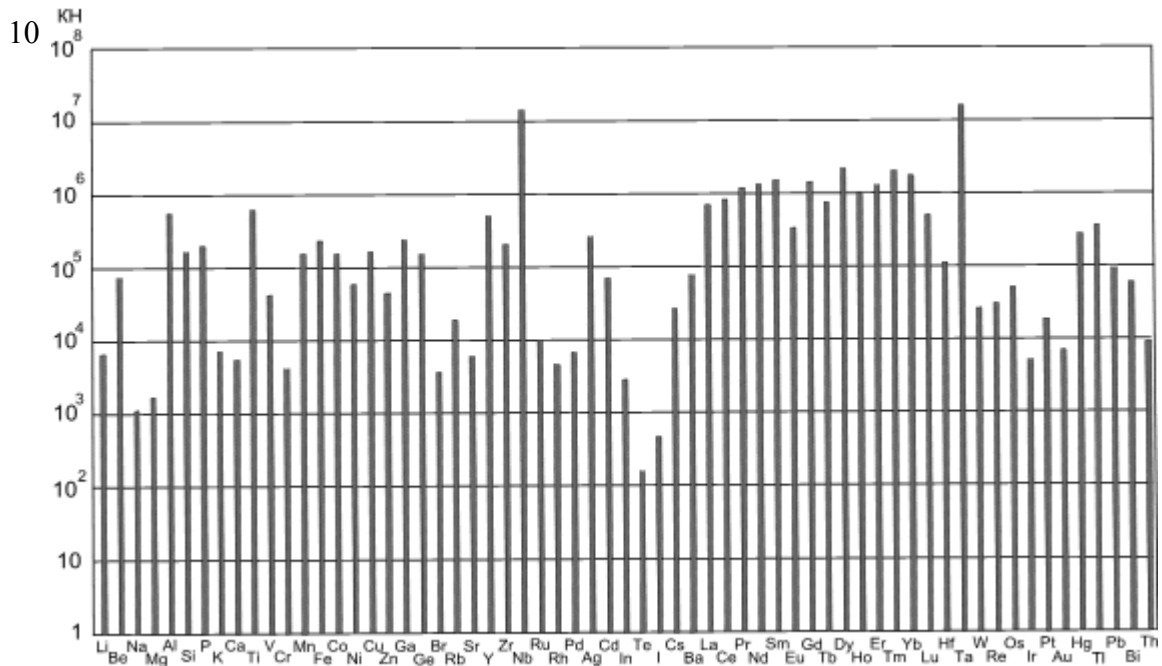


Рис. 10. Коэффициенты накопления химических элементов в зоопланктоне

мкг/г), Ge, Pd, Eu, Tb, Ho, Tm, Lu, Ta, Re, Ti ($1 - 10^{-1}$ мкг/г), Ru, Rh, In, Pt ($10^{-1} - 10^{-2}$ мкг/г), Ir, Te, Os, Au ($10^{-2} - 10^{-3}$ мкг/г) (Чеботина и др., 2011).

Отмечена достоверная положительная корреляционная связь ($R^2 = 0,854$; $p < 0,03$) между концентрациями химических элементов в зоопланктоне и водной среде (рис. 9). Эта связь свидетельствует о том, что зоопланктон в общих чертах отражает химический состав водной среды обитания организмов. Так как планктон практически мгновенно откликается на изменение химического состава воды, он может быть рекомендован как высокочувствительный биогеохимический индикатор загрязнения водной среды тяжелыми металлами и радионуклидами.

На рис. 10 представлены коэффициенты накопления КН изученных элементов зоопланктоном, которые варьируют от 10^2 до 10^7 единиц. Такая высокая накопительная способность этой группы организмов по сравнению с другими гидробионтами (Тимофеева-Ресовская, 1963) свидетельствует об уникальности данного объекта в процессах самоочищения природных вод. Полученные данные можно использовать для разработки методов индикации химического загрязнения континентальных во-

доемов с помощью планктонных организмов и как основание для разработки технологий биологической дезактивации промышленных сточных вод (Поляков, Егоров, 2003; Леонова и др., 2006; Трапезников и др., 2008; Гусева, Чеботина, 2011; Хлебников и др., 2011).

Заключение

Итоги многолетних исследований по изучению состояния зоопланктонного комплекса водоема-охладителя Белоярской АЭС позволяют выделить следующие основные результаты. Общий список зоопланктонных организмов в водоеме-охладителе за период исследования насчитывает 31 вид, из них 13 видов относятся к ветвистоусым рачкам, 5 – к веслоногим и 13 – к коловраткам. В разные временные интервалы в различных акваториях водоема по численности и биомассе преобладали ракообразные, при этом наибольшую часть биомассы (75–85 %) составляли ветвистоусые рачки. Ведущими формами зоопланктона были ракообразные *Bosmina kessleri*, *Chydorus sphaericus*, *Daphnia cristata*, *D. pulex* и *Eudiaptomus graciloides*. Численность и биомасса доминирующих видов за период исследований характеризовались заметной вариабельностью и зависели от многих факторов, в том числе от

сезона года, температуры водной среды, района исследований и др.

В прилегающей к АЭС зоне водоема-охладителя (Теплый залив, водосбросной и промливневый каналы) наблюдалось явное угнетение зоопланктона, проявляющееся в снижении его численности и биомассы и травмировании организмов.

В зоне сброса подогретой воды численность зоопланктона была ниже примерно в 4 раза по сравнению с контрольным районом, а биомасса – в 7 раз. Численность молоди здесь также была заметно ниже, чем в контрольном регионе. Повреждающее действие охлаждающих систем при прохождении через них воды, содержащей зоопланктон, проявлялось в том, что общая численность и биомасса зоопланктона в разные годы наблюдений снижалась примерно в 3 и 2 раза, соответственно. Анализ гибели доминирующих видов свидетельствует о том, что веслоногие рачки в большей степени подвергаются механическому травмированию при прохождении через агрегаты станции, чем ветвистоусые.

Воздействие стоков промливневой канализации проявляется в снижении численности и биомассы зоопланктона в 2 и 5 раз, соответственно, по сравнению с контрольным районом, а также в снижении общего числа видов в 2 раза и в изменении соотношения доминирующих видов.

Установлено, что в зоопланктоне промливневой канализации средняя концентрация ^{90}Sr составляла 139 ± 17 Бк/кг, а ^{137}Cs – 3250 ± 250 Бк/кг, тогда как в верхнем водоеме, где отсутствует сброс радионуклидов, в этот период она была соответственно 5 и 7 Бк/кг. При сравнении с другими гидробионтами и грунтами оказалось, что КН у фито- и зоопланктона на порядки величин выше.

На примере 70 химических элементов, присутствующих в воде в микроколичествах, показано, что их КН у зоопланктона варьируют в пределах от 10^2 до 10^7 единиц. Наличие достоверной положительной корреляционной связи между концентрациями химических элементов в зоопланктоне и их содержанием в водной среде

свидетельствует о том, что он в общих чертах отражает химический состав среды обитания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Урал_а 13-03-96061.

Литература

- Вицбискас Ю.Б. Состояние экосистем региона Игналинской АЭС // Актуальные проблемы геоэкологии: Междунар. науч. конф. Тез. докл. Тверь, 2002. Ч. 1. С. 240.
- Гусева В.П., Чеботина М.Я. Роль планктонных организмов в процессах накопления и переноса радиоактивных загрязнителей в водоеме-охладителе АЭС // Экология. 2011. № 2. С. 115–121.
- Егоров Ю.А. Экологическая безопасность атомных электростанций, работающих в России // Экологическая экспертиза (Обзорная информация). Москва, 2007. Вып. 2. С. 8–50.
- Егоров Ю.А., Карабань Р.Т., Нигматулин Б.И., Суздаева А.Л., Тихомиров Ф.А. Обеспечение экологической безопасности АЭС России // Экология и промышленность России. 2001. № 9. С. 9–16.
- Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР. Л.: Наука, 1970. 744 с.
- Крылов А.В. Видовой состав зоопланктона водоемов и водотоков котловины больших озер (Монголия) // Биология внутренних вод. 2012. № 3. С. 43–51.
- Колтик И.И. Атомные электростанции и радиационная безопасность. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2001. 365 с.
- Куликов Н.В., Чеботина М.Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. Свердловск: УрО РАН, 1988. 126 с.
- Леонова Г.А., Топоров А.В., Бобров В.А., Маликов Ю.И., Мельгунов М.С., Сухорук Ф.В. Радиоактивное загрязнение биогеоценоза реки Томь в зоне влияния предприятий ядерно-топливного цикла // Геоэкология. 2006. № 3. С. 225–234.
- Макаревич П.Р., Ишкулов Д.И. Структура и видовое разнообразие пелагических и донных биоценозов Баренцева моря в условиях меняющегося климата // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13, 4/1. С. 633–640.
- Мануйлова Е.Ф. Ветвистоусые рачки (Cladocera) фауны СССР. М.: Наука, 1964. 320 с.

- Мордухай-Болтовской Ф.Д.* Проблема влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (Обзор) // Экология организмов водохранилищ-охладителей. Л.: Наука, 1975. С. 7–70.
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. С.Я. Цалолихина. СПб, 1995. Т. 2. С. 3–627.
- Пашкова О.В.* Зоопланктон водоема-охладителя Чернобыльской АЭС до и после остановки станции // Гидробиологический журнал. 2009. Т. 45. № 5. С. 31–45.
- Пашкова О.В.* Зоопланктон как индикатор органического и токсического загрязнения и экологического состояния гидроекосистем (Обзор) // Гидробиологический журнал. 2012. Т. 48. № 6. С. 3–24.
- Протасов А.А., Семенченко В.П., Силаева А.А., Тимченко В.М.* Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки. Киев: ИГБ НАНУ. 2011. 234 с.
- Поляков Е.В., Егоров Ю.В.* Современные методы определения физико-химического состояния микроэлементов в природных водах // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 11. С. 1103–1114.
- Суздалева А.Л., Безносков В.Н.* Изменение гидрологической структуры водоемов и сукцессия водных биоценозов при их превращении в водоемы-охладители атомной (тепловой) электростанции // Инженерная экология. 2000. № 2. С. 47.
- Тимофеева-Ресовская Е.А.* Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов. Свердловск: УФАН СССР, 1963. 77 с.
- Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н., Гусева В.П., Николин О.А.* Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: АкадемНаука, 2008. 400 с.
- Хлебников Н.А., Поляков Е.В., Борисов С.В., Шепатковский О.П., Григоров И.Г., Кузнецов М.В., Швейкин Г.П., Смирнов С.В., Матафонов П.П., Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Гусева В.П.* Возможности применения композитных трековых мембран с нитритным покрытием для фракционирования микроэлементов в природной воде // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 1. С. 91–96.
- Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Куликов Н.В.* Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища. Свердловск: УрО АН СССР, 1992. 77 с.
- Чеботина М.Я., Гусева В.П., Трапезников А.В.* Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоеме-охладителе АЭС. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 170 с.
- Чеботина М.Я., Гусева В.П.* Воздействие Белоярской АЭС на состояние планктона в водоеме-охладителе // Уральский геофизический вестник. 2006. № 9. С. 76–80.
- Чеботина М.Я., Поляков Е.В., Гусева В.П., Хлебников Н.А., Суриков В.Т.* Геохимическая роль фито- и зоопланктона в извлечении химических элементов из водной среды // ДАН. 2011. Т. 439. № 5. С. 1138–1140.