

УДК 574.5(28):621.311.25

**А. А. Протасов, А. А. Силаева, Л. П. Ярмошенко,
Т. Н. Новосёлова, А. Б. Примак, А. Л. Савицкий**

**ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕХНО-ЭКОСИСТЕМЫ ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС¹**

Представлены результаты комплексных гидробиологических исследований техно-экосистемы Запорожской АЭС в условиях постоянной продувки в Каховское водохранилище. Проведена оценка долговременных изменений в донной и пелагической подсистемах.

Ключевые слова: водоём-охладитель, техно-экосистема, фитопланктон, зоопланктон, фитобентос, зообентос, фитоперифитон, зооперифитон.

Исследования техно-экосистем АЭС и ТЭС представляют собой важный раздел технической гидробиологии [3, 4, 14, 19]. Процессы, происходящие в техно-экосистемах, важны в аспекте как возможного или реального воздействия энергетических станций на окружающую среду, так и обратного воздействия различных биологических факторов на работу оборудования и технологические процессы. В зависимости от конструкции и режима эксплуатации водоёмов-охладителей связь с окружающими (фоновыми [18]) водоёмами может быть более или менее постоянной. Так, Запорожская ТЭС (ЗаТЭС) использует прямоточную систему охлаждения. Водоём-охладитель Запорожской АЭС эксплуатируется в режиме практически постоянной продувки (9 мес) с водовыпуском в Каховское водохранилище, в 2010 г. средний расход продувки составил 21,9 млн. м³/мес.

Целью данной работы было изучить гидробиологический режим водной части техно-экосистемы Запорожской АЭС, куда входит водоём-охладитель, подводный, отводящий каналы и каналы системы охлаждения (градирен и подпитки), провести сравнительный анализ структуры сообществ в водоёме-охладителе и фоновом водоёме (Каховском вдхр.), а также сравнение с ранее полученными данными.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Государственного Фонда фундаментальных исследований Украины (проект Ф41.4/028).

© А. А. Протасов, А. А. Силаева, Л. П. Ярмошенко, Т. Н. Новосёлова, А. Б. Примак, А. Л. Савицкий, 2013

Водоём-охладитель Запорожской АЭС (ВО ЗАЭС) является одним из наиболее техногенно нагруженных в Украине: он входит в техно-экосистему самой крупной в Европе АЭС (мощность 6000 МВт). Его объём составляет 47,0 млн. м³, площадь водного зеркала — 8,2 км², средняя глубина — 5,0, максимальная — 13,6 м. От Каховского вдхр. ВО отделен песчаной намывной дамбой шириной 400 м. Подпитка производится за счёт части сбросных циркуляционных вод ЗаТЭС. Особенностью системы охлаждения является то, что часть воды из отводящего канала поступает непосредственно в подводный канал через брызгальные устройства. Подпитка ВО осуществляется за счёт сбросных вод ЗаТЭС: вода попадает в канал градирен, а затем в подводный канал (рис. 1). Из системы оборотного водоснабжения ЗАЭС в ВО поступает 21,6 млн. м³ подогретой воды в сутки, то есть внутренний водообмен в техно-экосистеме ЗАЭС весьма значительный — объём воды, равный объёму ВО, проходит через систему охлаждения станции более 10 раз в месяц.

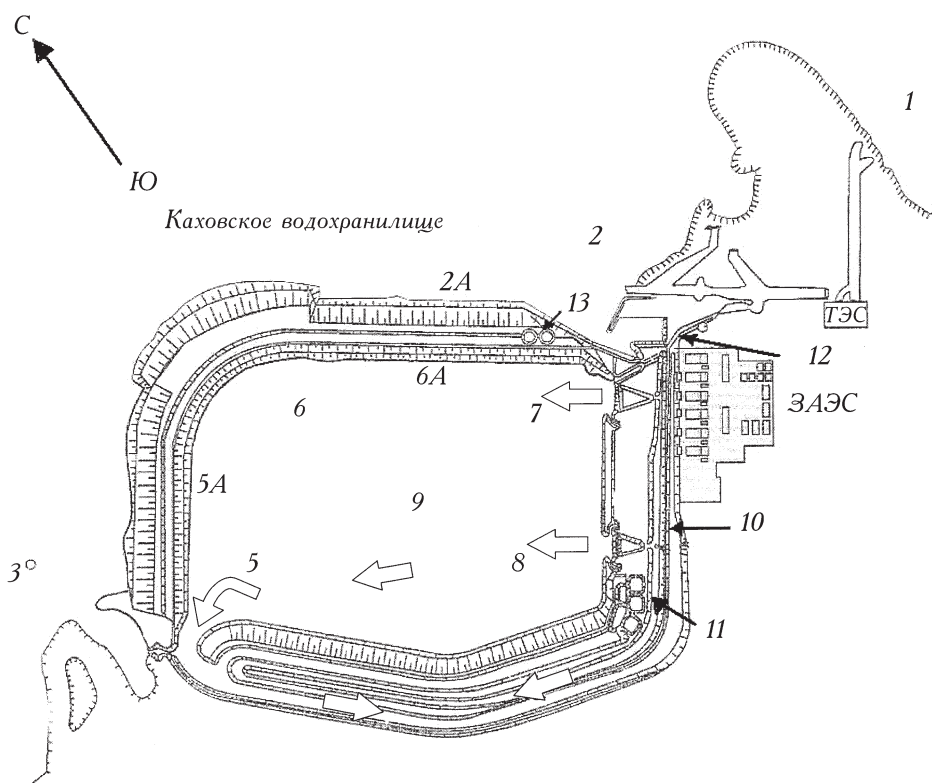
Материал и методика исследований. Гидробиологические исследования ВО ЗАЭС и прилегающей акватории Каховского вдхр. проводили в сентябре — октябре 2011 г. Акваторию ВО условно разделили на северный, восточный, западный, центральный и южный районы. Пробы отбирали по всей акватории ВО, в подводном и отводящем каналах, канале подпитки от ЗаТЭС и сбросном канале от первой градирни (см. рис. 1). Также проведено обследование участка Каховского вдхр., прилегающего к ВО (ст. 1—3). Температура воды в ВО в период обследования была в пределах 26,0—29,5°C, в отводящем канале — 25,5°C, в отводящем — 31,6°C. В Каховском водохранилище она значительно ниже — 15,0—15,5°C. Вода в ВО ЗАЭС и Каховском вдхр. характеризовалась невысокой прозрачностью — 0,7—1,3 м (минимальной она была на ст. 2, максимальной — на ст. 9).

Общую численность бактериопланктона¹ определяли методом прямого счёта на мембранных фильтрах, биомассу — расчётным методом [9, 11]. Пробы фитопланктона² отбирали из поверхностного горизонта и обрабатывали в лаборатории по стандартным методикам [2, 11, 20]. Пробы зоопланктона отбирали из поверхностного горизонта в подводном, отводящем и канале подпитки от ЗаТЭС, а также на ст. 9 с глубины 4 м, в Каховском вдхр. (ст. 1—3) — с глубины 1 м. Воду объёмом 25 или 50 л профильтровывали через сеть Апштейна № 64 [8]. На станциях ВО зоопланктон отбирали методом тотального лова, профильтровывая столб воды от глубины 3,0—3,5 м до поверхности. Пробы микрофитобентоса отбирали и обрабатывали по общепринятым методикам [2, 20] в фотической зоне (глубина 0,6—0,8 м) на прибрежных участках ВО (ст. 5А и 6А) и плотины охладителя со стороны Каховского вдхр. (ст. 2А). Качественные пробы фитоперифитона были отобраны с гидротехнических устройств в брызгальных бассейнах ответственных потребителей.

Пробы зообентоса отбирали, кроме основных точек по акватории ВО, на прибрежных участках (ст. 5А, 6А, 2А) с использованием секционного дно-

¹ Обработка проб проведена Л. И. Багниук.

² Обработка проб проведена Л. И. Стеценко.



1. Схема системы охлаждения ЗАЭС и расположение станций отбора проб в период обследования (сентябрь — октябрь 2011 г.). Схема предоставлена Службой охраны окружающей среды ЗАЭС. Каховское вдхр.: 1 — район водозабора ЗаТЭС; 2 — район сброса подогретой воды ЗаТЭС; 2А — прибрежные мелководья; 3 — напротив выхода продувки ВО ЗАЭС. Водоём-охладитель: 5 — западный район; 5А — прибрежные мелководья западного района; 6 — северный район; 6А — прибрежные мелководья северного района; 7 — восточный район; 8 — южный район; 9 — центр ВО; 10 — подводящий канал; 11 — сбросной канал; 12 — канал подпитки от отводящего канала ЗаТЭС; 13 — сбросной канал от 1-й градирни. Светлыми стрелками показано направление токов воды в системе.

черпателя (СДЧ-100) с площадью захвата 0,01 м и промывали через мельничный газ № 27. Пробы зооперифитона отбирали с различных субстратов при помощи гидробиологического скребка или путем срыва с поверхности. Обследовали прибрежные участки охладителя, подводящего и отводящего каналов, канала подпитки АЭС, канала сброса 1-й градирни и Каховского вдхр.

Все пробы фиксировали 4%-ным раствором формальдегида. Анализ гидробиологического материала проводили с использованием оригинального пакета прикладных программ WaCo [22]. При описании таксономического состава беспозвоночных использовали термин НОТ — низший определяемый таксон [1], который обозначает таксоны как видового, так и более высоко ранга, в соответствии с возможностями идентификации организмов. В доминирующий комплекс включали виды/НОТ, доля которых в общих показателях составляла 50% и более. Сходство таксономического состава оценивали по соответствующим коэффициентам [12]. Ценозы выделяли на

основании сходства таксономического состава и степени доминирования (более 50% численности и биомассы).

Результаты исследований

Численность *бактериопланктона* на различных участках ВО колебалась от 2,02 до 3,20 млн. кл/см³. Наибольшим значением отличался восточный район (ст. 7), без учёта отводящего канала, где этот показатель достигал 3,34 млн. кл/см³ и где отмечены крупные клетки бактерий, ассоциированные в агрегаты.

В Каховском вдхр. на ст. 1 и 3 численность бактериопланктона была несколько ниже — соответственно 2,10 и 1,80 млн. кл/см³, что, вероятно, связано с более низкой температурой воды. Значения биомассы бактериопланктона изменялись аналогично значениям численности.

В *фитопланктоне* ВО было обнаружено 56 таксонов водорослей рангом ниже рода из шести отделов. Основу видового богатства формировали зелёные, синезелёные и диатомовые водоросли — соответственно 50,9, 20,0 и 16,4% общего количества видов. На долю эвгленовых, криптофитовых и динофитовых приходилось соответственно 7,3, 3,6 и 1,8%. Количество видов на отдельных станциях изменялось от 22 до 32, минимальным оно было в сбросном канале (ст. 11), максимальным — в западном районе водоёма (ст. 5).

Численность фитопланктона в техно-экосистеме составляла от 10,6 до 43,1 млн. кл/дм³, наименьшая отмечена в подводящем канале (ст. 10), наибольшая — в канале подпитки ТЭС (ст. 12), где в массе развивалась синезелёная водоросль *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing. Наибольшая численность в собственно ВО отмечена на ст. 9 и 5 (соответственно 26,1 и 35,3 млн. кл/дм³). Наиболее обильной группой на всей исследованной акватории были синезелёные (41,6—88,2% общей численности), в состав доминирующего комплекса входили *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs., *M. aeruginosa*, *Merismopedia elegans* A. Braun и *Oscillatoria* sp. Доля диатомовых в общей численности составляла 9,2—39,0%, среди них преобладали *Synedra acus* Kütz. и *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim. На долю зелёных водорослей приходилось 2,5—27,2% в основном за счёт развития *Desmodesmus communis* (E. Hegew) E. Hegew и *Phacotus coccifer* Korsch. Остальные группы водорослей существенной роли в формировании численности не играли. Биомасса фитопланктона была в пределах 2,8—8,9 мг/дм³, максимальные значения были зарегистрированы в центральном и западном районах. Ведущая роль в её формировании на всей акватории ВО принадлежала диатомовым (36,8—74,6%) и зелёным (11,5—54,3%) водорослям, за исключением канала подпитки и сбросного канала, где в доминирующий комплекс входили и синезелёные (*M. aeruginosa* и *Aph. flos-aquae*).

На исследованном участке Каховского вдхр. было обнаружено 30 таксонов водорослей рангом ниже рода из шести отделов. Наибольшим количеством таксонов были представлены диатомовые — 37,9%, доля зелёных составляла 31,0, синезелёных — 20,7, эвгленовых, динофитовых и криптофитовых

— по 3,4%. Количество видов на отдельных станциях колебалось от 12 (ст. 1) до 24 (ст. 2). Численность и биомасса составляла 8,6—33,9 млн. кл/дм³ и 3,2—16,0 мг/дм³. Наибольшие значения зарегистрированы в районе сброса подогретой воды ЗаТЭС (ст. 2). Ведущая роль в численности фитопланктона (51,8—70,3%) принадлежала синезелёным водорослям, в массе развивались *Aph. flos-aquae*, *M. aeruginosa*, *M. elegans* и *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Brèb. Биомасса формировалась диатомовыми (85,9—93,4%), преимущественно крупноклеточной *A. granulata*.

Анализ таксономического сходства по методу Смирнова позволил выделить несколько групп станций со сходным составом фитопланктона — в первую группу объединились ст. 1—3 в Каховском вдхр. и канал подпитки, во вторую — ст. 6, 7, 8 и 11 ВО (табл. 1). Западная часть ВО (ст. 5), прилегающая к входу в подводящий канал и сооружениям продувки, была достаточно обособлена, здесь зарегистрировано семь видов водорослей, не встречавшихся на других станциях. Фитопланктон на этой станции характеризовался наибольшей оригинальностью ($t_{xx} = 161$) и довольно высокой связью ($t_{5-9} = 10$) лишь с центральной частью (ст. 9), фитопланктон этих станций объединили в третью группу. Фитопланктон подводящего канала (ст. 10) имел определённое сходство состава как с фитопланктоном ВО ($t_{xy} = 2$ и 3, со ст. 8 и 9), так и Каховского вдхр. ($t_{1-10} = 9$). На ст. 1 и 10 отмечено десять общих для этих станций видов и один (*Pediastrum simplex* Meyen) — встреченный лишь здесь и на ст. 5.

Доминирующий комплекс водорослей был довольно сходным во всех альгоценозах как в техно-экосистеме, так и в Каховском вдхр., где альгоценоз *M. aeruginosa* + *Aph. flos-aquae* + *A. granulata* отличался значительным доминированием *A. granulata* по биомассе. Это определило низкое значение показателя видового разнообразия. Центральная и западная части ВО были обособлены, отмеченные здесь численность и биомасса почти в два раза выше, чем на остальной акватории. Показатели богатства фитопланктона и выравнивания с повышением температуры возрастали, поэтому возрастало и разнообразие в целом (рис. 2).

В зоопланктоне исследованных водных объектов было отмечено 58 НОТ (46 видов) беспозвоночных, из них 31 — коловраток, 17 — ветвистоусых, 9 — веслоногих ракообразных, а также велигеры дрейссены. Из них в ВО — 29, в каналах и Каховском вдхр. — по 33 НОТ. Внимания заслуживает обнаружение редких для фауны Днепра видов планктонных беспозвоночных: коловратки *Tripleuchlanis plicata* Levander (в отводящем канале), циклопа *Eucyclops denticulatus* (Graeter) (в подводящем канале) и понто-каспийского ветвистоусого рачка *Cercopagis tenera* Sars (в Каховском вдхр.).

Средняя по ВО численность зоопланктона составляла 488,6 тыс. экз/м³, биомасса — 2,24 г/м³. Основу численности (75,5%) формировали ювенильные стадии веслоногих ракообразных. По биомассе выраженного доминанта не было, доля ювенильных веслоногих в общей биомассе составляла 27,6%, *Moina micrura* Hellich — 27,2, *Acanthocyclops americanus* (Marsh) — 18,8, *Diaphanosoma dubia* Manuilova — 15,0%. Показатели обилия на отдель-

ных станциях значительно различались — численность изменялась в пределах 448,9—849,5 тыс. экз/м³, а биомасса — 1,66—4,20 г/м³.

Анализ сходства таксономического состава по методу Смирнова показал, что наиболее оригинальным был состав зоопланктона подводящего и отводящего каналов (соответственно $t_{xx} = 140$ и 204) и участков Каховского вдхр. (на ст. 2 $t_{xx} = 154$, на ст. 1 $t_{xx} = 134$). Установлено наличие высоких положительных связей между станциями ВО (первая группа) и Каховского вдхр. (вторая группа), высоким было сходство состава и в каналах (третья группа).

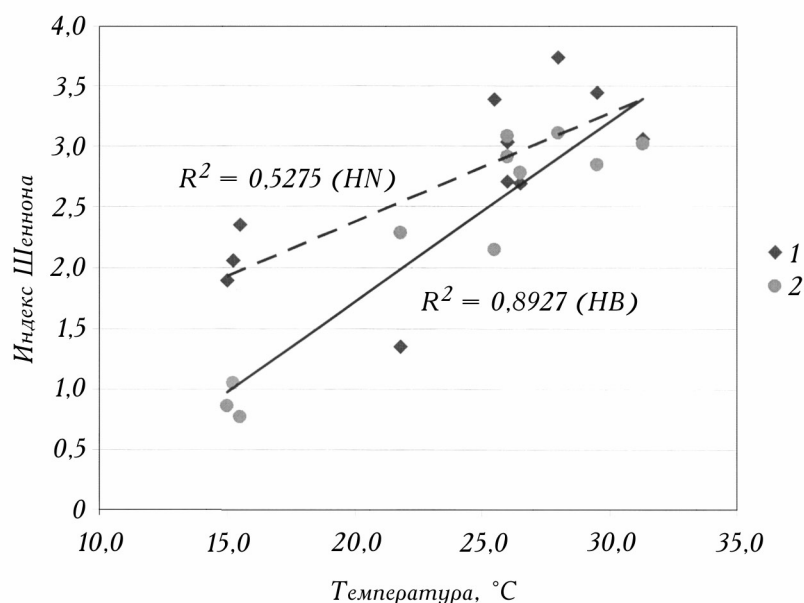
На основании сходства и степени доминирования зоопланктона исследованных водных объектов было выделено четыре зоопланктоценоза (табл. 2). По составу и доминантам существенно различались ценозы техно-экосистемы АЭС и фонового водоёма. Хотя состав доминирующего комплекса в ценозе Каховского вдхр. близок таковому канала подпитки, целесообразно выделение последнего, поскольку показатели обилия зоопланктона здесь на 1—2 порядка ниже, чем в водохранилище, кроме того, эти ценозы локализованы в разных биотопах. Такая трансформация структуры зоопланктона связана с его прохождением через системы охлаждения ЗаТЭС. Для зоопланктоценозов техно-экосистемы характерны высокие показатели обилия при выраженном доминировании и, соответственно, более низкое видовое разнообразие, чем в Каховском вдхр..

В микрофитобентосе водоёма-охладителя было иденти-

1. Структурные характеристики ценозов фитопланктона в техно-экосистеме Запорожской АЭС и фоновом водоёме (Каховское водохранилище), осень 2011 г.

Альгоценозы	Локализация (станции)	Количество видов	N , млн. кл/лм ³	CV по N , %	B , мг/лм ³	CV по B , %	H_N	H_B
1. <i>M. aeruginosa</i> + <i>Aph. flos-aquae</i> + <i>A. granulata</i>	1, 2, 3, 12	36	25,13 ± 8,07	64,23	7,6 ± 2,91	76,61	2,438	1,470
2. <i>Aph. flos-aquae</i> + <i>S. acus</i> + <i>Ph. coc-cifer</i> + <i>A. granulata</i> , + <i>S. hantzschii</i>	6, 7, 8, 11	38	17,09 ± 1,46	17,05	4,34 ± 0,87	40,1	3,522	3,184
3. <i>A. granulata</i> + <i>S. acus</i> + <i>Aph. flos-aquae</i>	5, 9	38	30,78 ± 4,59	21,09	7,46 ± 1,46	27,68	2,742	2,934
4. <i>A. granulata</i> + <i>Aph. flos-aquae</i> + <i>M. aeruginosa</i>	10	23	10,64	—	2,9	—	3,387	2,143

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: N — численность; B — биомасса; CV — коэффициент вариации; H_N — индекс Шеннона, рассчитанный по численности, бит/экз.; H_B — индекс Шеннона, рассчитанный по биомассе, бит/г.



2. Зависимость разнообразия фитопланктона от температуры в техно-экосистеме ЗАЭС и Каховском вдхр.: 1 — HN, бит/экз.; 2 — HB, бит/г.

фицировано 32 вида водорослей из пяти отделов. Наиболее богаты видами были зелёные водоросли, за ними следовали синезелёные и диатомовые. В составе микрофитобентоса в Каховском вдхр. в районе дамбы ЗАЭС (ст. 2А) обнаружено 11 видов, относящихся к трём отделам: Cyanophyta, Chlorophyta (по 9,1% общего количества видов) и Bacillariophyta (81,8%). Микрофитобентос ВО и Каховского вдхр. характеризовался низкой степенью сходства, коэффициент Сёренсена не превышал 0,15—0,17.

Количественные показатели микрофитобентоса ВО на песчаных грунтах (ст. 5А и 6А) составляли 43715 млн. кл/м² и 6,05 г/м². По численности (63,4% общей) преобладала *Merismopedia tenuissima* Lemmerm. Максимальных значений достигала биомасса *Golenkinia radiata* Chodat (32,4% общей), *Aulacoseira granulata* (25,1%) и *Cosmarium rectangulare* Grunow (22,0%). Количественное развитие микрофитобентоса в Каховском вдхр. было значительно ниже, чем в ВО, средняя численность составила 417 млн. кл/м², а биомасса — 1,46 г/м². Доминирующий комплекс был представлен *Aulacoseira granulata* (46,9% численности и 61,6% биомассы), *Diatoma vulgare* Borg (соответственно 18,6 и 24,6%) и *Staurosira construens* Ehrenb. (20,9% численности).

Зообентос техно-экосистемы ЗАЭС насчитывал 20 НОТ беспозвоночных из 7 групп, наибольшим количеством таксонов были представлены олигохеты — 8 НОТ (из сем. Naididae и Tubificidae) и личинки хирономид — 7 НОТ. Количество НОТ по отдельным станциям колебалось от 1 до 10, максимальным было в западном районе (ст. 5, перед каналом продувки), где грунты, в отличие от других участков ВО, представлены слабо заиленной ракушкой дрейссены, минимальным — в северном районе (ст. 6) на заиленном пе-

ске. Таксономический состав зообентоса подводящего канала отличался специфичностью, два вида — олигохеты *Branchiura sowerbii* Beddard и личинки хирономид *Psectrocladius dilatatus* Wulp были обнаружены только здесь.

Количественные показатели зообентоса были низкими, особенно биомасса. В глубоководной части ВО численность составляла от 450 до 7450 экз/м², биомасса — от 0,16 до 2,62 г/м². Наибольшие значения были отмечены в западном районе (ст. 5), что объясняется не только наибольшим отдалением от сброса подогретых вод, но и типом грунта. Доминанты по показателям обилия на станциях акватории ВО были различными, в основном олигохеты и личинки хирономид. Численность и биомасса зообентоса в подводящем канале были близкими к показателям в ВО, однако доминировали личинки ручейников.

Таксономический состав зообентоса исследованного участка Каховского вдхр. насчитывал 27 НОТ из 10 групп. Видовой состав был богаче благодаря наличию на значительной (10 м) глубине (ст. 1) поселений дрейссены двух видов (*Dreissena bugensis* Andr. и *D. polymorpha* Pall.). Здесь отмечено 7 НОТ, не обнаруженных на других станциях: многощетинковые (*Hypania invalida* Grube) и малощетинковые (*Stylaria lacustris* (L.)) черви, равноногие (*Jaera sarsi* Walkapov) и разноногие ракообразные (из сем. Gammaridae и Corophiidae), брюхоногие моллюски (*Theodoxus fluviatilis* (L.)). На сильно заиленных участках Каховского вдхр. (ст. 2, 3) видовой состав зообентоса был очень беден — обнаружены представители р. *Dero*, тубифициды, *Chironomus plumosus* L. и *Procladius ferragineus* Kieffer — типичные виды-пелофилы.

Количественные показатели зообентоса исследованного участка Каховского вдхр. были существенно выше, чем ВО. Достаточно высокую биомассу на сильно заиленных участках (ст. 2, 3) определял *Ch. plumosus*. Участки, расположенные у выхода канала продувки ЗАЭС (ст. 3), то есть подверженные влиянию подогрева, отличались значительно более высокими показателями обилия (см. табл. 3). Группировки зообентоса, в которых присутствовала дрейссена,

2. Структурно-функциональные характеристики ценозов зоопланктона в техно-экосистеме Запорожской АЭС и фоновом водоёме (Каховское водохранилище), осень 2011 г.

Ценозы	Станции	Количество НОТ	N, тыс. экз/м ³	CV по N, %	B, г/м ³	CV по B, %	H _N	H _B	Деструкция, кДж/м ³ ·сут	Продукция, кДж/м ³ ·сут
<i>M. mixtura</i> + <i>A. americanus</i>	6, 7, 5, 8, 9	29	488,6	61,25	2,24	69,40	1,769	2,718	3,597	1,133
<i>A. americanus</i>	10, 11	33	166,6	1,09	1,22	0,12	1,571	1,361	2,471	0,778
<i>A. priodontia</i> + <i>A. americanus</i>	1, 2, 3	33	93,1	88,28	0,37	46,85	2,702	3,004	0,196	0,062
<i>A. priodontia</i> + <i>B. longirostris</i>	12	15	6,3	—	0,03	—	2,896	2,133	0,025	0,008

характеризовались максимальной биомассой (692,98 г/м² при численности 17 700 экз/м²), которую здесь определяла *D. bugensis* (91,2% общей), доля *D. polymorpha* была невысокой (4,5%). Субдоминантами по биомассе были разноногие ракообразные Gammaridae и Corophiidae (соответственно 13,78 и 11,04 г/м²; 53,2 и 42,6% биомассы мягкого бентоса). Песчано-галечный биотоп прибрежных участков Каховского вдхр. (ст. 2А) отличался достаточно высокими показателями обилия зообентоса. Дрейссена здесь не отмечена, доминировали псаммофильные виды олигохет и личинок хирономид (см. табл. 3).

Исходя из сходства таксономического состава зообентоса ВО, подводящего канала и участка Каховского вдхр., с учётом структуры доминирования и показателей обилия, было выделено четыре ценоза (см. табл. 3). Локализованные в техно-экосистеме ценозы отличались невысокими показателями обилия и продуктивностью, наибольшие значения зарегистрированы в ценозе *Ch. plumosus* + Tubificidae Каховского водохранилища.

В фитоперифитоне на брызгальных установках в бассейне охлаждения системы ответственных потребителей обильно вегетировали эврибионтные и эвритермные желтозелёные водоросли р. *Vaucheria* D.C. Среди её нитей встречались *Spirogyra* st. st., *Mougeotia* sp. и в небольшом количестве *Pseudonabaena limnetica* (Lemmerm.) Komárek (= *Oscillatoria limnetica* Lemmerm.). Особенностью системы охлаждения ЗАЭС является наличие большого количества брызгальных устройств (более 6000 сопел), поэтому массовое развитие этих водорослей может создавать существенные биологические помехи.

В фитоперифитоне отводящего канала на щебёночном субстрате обильно вегетировал *Porphyrosiphon luteus* (Gom.) Anagn., Komárek (= *Lyngbya lutea* (Ag.) Gom.). Согласно литературным данным [21] этот вид широко распространён на скалистых побережьях морей и континентальных солёных, солоноватых и пресноводных водоёмов, а также в горячих источниках. Среди его нитей найдены *Ps. limnetica*, *Merismopedia tenuissima*, *Cosmarium rectangulare*, *Phacotus coccifer*, *Desmodesmus communis*, *Desmodesmus opoliensis* (P. Richt.) Hegew. и *Fragilaria capucina* var. *rumpens* (Kütz.) Lange-Bert. ex Bukht.

Эпифитонная группировка в Каховском вдхр. на рдесте *Potamogeton perfoliatus* L. включала 21 вид водорослей: 17 — диатомовых, 3 — зелёных и один вид стрептофитовых (*Mougeotia* sp.). Численность эпифитонного альгоценоза составила 53 млн. кл., биомасса — 258,09 мг на 1 г сырой массы рдеста. По численности преобладали *Stigeoclonium* sp. (31% общей), диатомовые *Diatoma vulgare* (27%), *Encyonema elginense* (Kram.) Mann (11%), по биомассе — *Oedogonium* sp. (54%) и *D. vulgare* (7%).

В зооперифитоне ВО и систем водоснабжения ЗАЭС отмечено 23 НОТ беспозвоночных из десяти групп. Наиболее богато были представлены олигохеты и личинки хирономид — соответственно шесть и пять НОТ, двумя — кишечнополостные (*Hydra* sp., *Cordilophora caspia* Pall.), по одному НОТ — разноногие раки, личинки жуков, ручейников и двукрылых, ракушковые

раки и мшанки. Обнаружен также пресноводный вид Kamptozoa *Urnatella gracilis* Laidy, который является термофильным видом американского происхождения и в Европе встречается преимущественно в водоёмах-охладителях [13]. Количество таксонов на отдельных станциях было невысоким и не зависело от типа субстрата.

Зооперифитон на древесном субстрате в прибрежной зоне ВО (ст. 6А) насчитывал 5 НОТ из четырех групп. Численность беспозвоночных составляла 10 000 экз/м², биомасса — 8,22 г/м². Численно преобладали личинки хирономид *Cricotopus silvestris* Fabr. (типичного представителя перифитона на различных субстратах) и ручейников *Ecnomus tenellus* (соответственно 40,0 и 35,0% общей). По биомассе преобладал *E. tenellus* (80,3% общей), который определял и доминирование хищников по общей деструкции (82,1%).

В составе зооперифитона на подводящего канала (ст. 10) отмечено 15 НОТ из восьми групп, кроме олигохет и личинок хирономид зарегистрированы кишечнополостные, ракушковые раки, личинки жуков, ручейников и двукрылых. Средняя численность и биомасса зооперифитона составляла 3899 экз/м² и 1,14 г/м². Доминировали личинки хирономид (55,4% общей численности и 53,7% общей био-

3. Структурно-функциональные характеристики ценозов зообентоса в техно-экосистеме Запорожской АЭС и фоновом водоёме (Каховское водохранилище), осень 2011 г.

Ценозы	Станции	Количество НОТ	N, экз/м ²	CV по N, %	B, г/м ²	CV по B, %	H _N	H _B	Деструкция, кДж/м ² ·сут	Продукция, кДж/м ² ·сут
<i>Dero</i> + <i>Ch. plumosus</i> + <i>Hydra</i> + Hirudinea	7, 5, 8, 9	14	2338 ± 1707	146,04	0,89 ± 0,58	130,42	2,634	2,433	0,28	0,10
<i>Rh. exiguus</i> + <i>C. mancus</i> + Ostracoda	5А, 6А	8	4075 ± 1275	44,25	0,37 ± 0,29	112,72	1,955	2,098	0,21	0,07
<i>E. tenellus</i>	10	10	3450 ± 1750	71,74	1,82 ± 0,86	66,68	1,961	1,316	0,78	0,27
<i>Ch. plumosus</i> + Tubificidae	2, 3	9	15150 ± 12950	120,88	57,70 ± 31,70	77,69	2,532	1,249	5,27	1,84
<i>D. bugensis</i> + Gammaridae	1	12	17700	—	692,98	—	2,690	0,610	11,14	3,90
<i>L. arenicola</i> + Enchytraeidae	2А	9	24063	—	18,21	—	2,474	2,021	2,55	0,89
Tubificidae	6	1	850	—	0,62	—	0	0	0,20	0,07

массы). На урезе биомассу зооперифитона определяли личинки *C. silvestris* (63,5% общей), на глубине 2 и 4 м — личинки нескольких видов хирономид и ручейников, а на глубине 4 м к ним присоединились еще и гидры. Фильтраторы в подводящем канале отсутствовали, основная доля общей деструкции приходилась на собирателей и хищников.

В составе зооперифитона *отводящего канала* (ст. 11) отмечено 6 НОТ беспозвоночных, таксономический состав на бетоне и щебне был практически одинаковым, а показатели обилия и доминанты различались. На вертикальной бетонной поверхности численность составляла 1076 экз/м², доминировали ракушковые раки (41,9%) и личинки *C. silvestris* (32,3%). Биомасса достигала лишь 0,19 г/м², преобладали личинки хирономид. На камнях количественные показатели зооперифитона были несколько выше — 14 333 экз/м² и 1,13 г/м². По биомассе доминировали ракушковые раки и личинки хирономид, а по численности — олигохеты *Pristina aequiseta* Bourne (60,5% общей). По общей деструкции доминировали собиратели (83,7%).

В составе зооперифитона *канала погнутки* (ст. 12) отмечено 5 НОТ из четырёх групп. Зооперифитон бетонной облицовки берега был беден, обнаружено всего два вида (1444 экз/м² и 0,14 г/м²). По численности и биомассе преобладали личинки *C. silvestris* — соответственно 92,3 и 98,6% общих показателей. На металлических конструкциях найдена *U. gracilis*. Зооперифитон на металле характеризовался более высокими значениями — 4444 экз/м² и 17,03 г/м², по численности доминировали олигохеты р. *Nais* (66,7%), по биомассе — *U. gracilis* (95,5%). Фильтраторы и собиратели доминировали по деструкции.

Количество таксонов зооперифитона в *сбросном канале от 1-й градирни* (ст. 13) также было невысоким — 5 НОТ из трёх групп, таксономический состав отличался наличием двух видов гаммарид (*Dikerogammarus haemobaphes* (Eichwald) и *Chaetogammarus ischnus* Stebbing), не отмеченных на других станциях ВО и системы водоснабжения ЗАЭС. Численность зооперифитона здесь была достаточно высокой — 22167 экз/м², при относительно небольшой биомассе — 5,07 г/м². По численности доминировали олигохеты *Nais communis* Piquet (97,7% общей), по биомассе — олигохеты (73,1% общей). По деструкции доминировали собиратели (96,9% общей).

Прибрежный зооперифитон на каменном субстрате в *Каховском вдхр.* (ст. 2А, плотина ЗАЭС) был крайне беден — отмечено лишь два вида беспозвоночных: гаммариды *Pontogammarus maeoticus* (Sowinsky), обитающие в основном в зоне заплеска, и *C. silvestris*. Численность и биомасса была невысокой — 1600 экз/м² и 12,19 г/м², доминировали гаммариды, а общую деструкцию определяли собиратели. Таким образом, количественные показатели зооперифитона на разных станциях и субстратах значительно различались и в целом были достаточно невысокими.

Высшая водная растительность водных объектов ЗАЭС представлена практически одним видом растений — гелофитом тростником обыкновенным *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Его заросли расположены по периметру всего водоёма полосой шириной до 1 м. В отличие от других

водоёмов, где воздушно-водная растительность сплошной полосой или мозаично входит в воду с достаточно равномерным распределением стеблей на дне [7, 10, 19], в ВО ЗАЭС преобладали островки тростника с очень большой плотностью — более 100 стеблей/м². Фитомасса тростника в ВО составляла в среднем 5,31 кг/м² (в плотных куртинах), в канале подпитки от ЗаТЭС — 2,52, в отводящем канале — 1,0, а в Каховском вДхр. — 5,59 кг/м². В водохранилищах Днепра средняя сырая фитомасса тростника составляет около 3 кг/м² [16].

Обсуждение результатов исследований

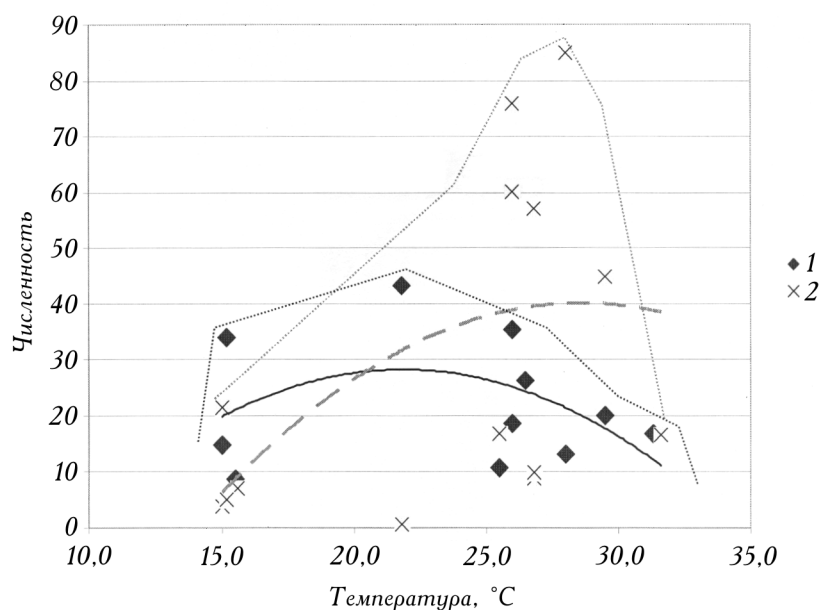
Гидробиологический режим техно-экосистемы ЗАЭС имеет определённые особенности, связанные с режимом эксплуатации, конструкцией системы охлаждения и термическим режимом, которые отличают его от других техно-экосистем АЭС Украины [3, 15, 19]. Конструктивными особенностями является наличие дополнительно к водоёму-охладителю брызгальных устройств и градирен, эксплуатационными — подпитка всей системы охлаждения сбросными водами тепловой электростанции и практически постоянная продувка ВО.

Важным экологическим фактором для биоты является высокая температура воды в охлаждающей системе ЗАЭС, которая даже в осенний период в ВО достигает 30°С, что вдвое выше, чем в фоновом водоёме (Каховском вДхр.).

Зависимость численности фитопланктона и зоопланктона от температуры имела сложный характер (рис. 3). Применение метода огибающей кривой [5] показывает, что в период исследований наблюдалась тенденция возрастания численности зоопланктона при 25—26°С, при дальнейшем повышении температуры она снижалась. Численность фитопланктона имела тенденцию возрастания до 21°С, при дальнейшем повышении температуры она снижалась.

Температура не играла определяющей роли в изменении видового богатства зоопланктона. Коэффициент корреляции между температурой и количеством НОТ был положительным и невысоким ($r = 0,131$). Хотя чёткая зависимость богатства НОТ от температуры не выявлена, следует отметить, что в отводящем канале, где температура была наибольшей и зоопланктон подвергался значительным механическим воздействиям при прохождении через различные системы охлаждения (циркводоснабжение, брызгальные системы), количество видов было одним из наибольших. Для фитопланктона было характерно хорошо выраженное возрастание видового богатства при увеличении температуры.

Температурный режим влиял не только на показатели обилия, изменялась также структура сообществ. Разнообразие зоопланктона, рассчитанное по индексу Шеннона (по численности), закономерно снижалось с увеличением температуры (рис. 4), для разнообразия по биомассе какой-либо закономерности не выявлено. Как было отмечено выше, одна из составляющих разнообразия — богатство сообществ практически не зависела от темпера-



3. Изменение численности фито- и зоопланктона в градиенте температуры: 1 — численность фитопланктона, млн. кл/дм³; 2 — численность зоопланктона, экз/0,1 дм³.

туры, и, таким образом, основное значение имел второй компонент — выравненность. Для фитопланктона зависимость разнообразия от температуры была противоположной (см. рис. 2), поскольку при увеличении температуры ни богатство, ни выравненность не снижались.

Следует отметить черты сходства и различия в пространственном распределении ценозов фито- и зоопланктона. Например, зоопланктоценоз *M. micrura* + *A. americanus* занимал практически весь ВО, в то же время на этой акватории было выделено два альгоценоза (см. табл. 1, 2). При этом планктоценозы в подводящем и отводящем каналах различались: в зоопланктоне здесь был выделен единый ценоз, а фитопланктон отводящего канала был близок к фитопланктону ВО. Следует также отметить ценоотическую неоднородность планктона и бентоса и их количественных показателей в ВО и каналах, несмотря на значительный внутренний водообмен. Так, наибольшими показателями обилия выделяется западный район ВО (ст. 5).

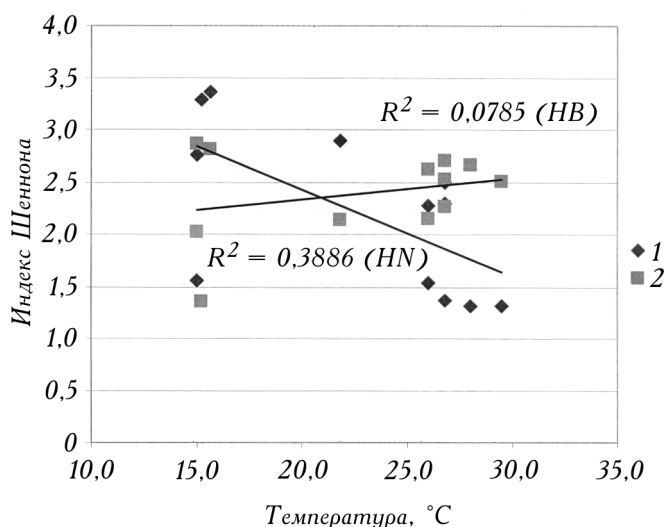
Проведено сравнение результатов с данными гидробиологических исследований, выполненных в условиях отсутствия продувки (1995 г.). В воде ВО ранее отмечалось повышенное содержание ионов хлора и сульфатов, минерализация достигала 600—632 мг/дм³, прозрачность в ВО была низкой — от 0,45 до 0,60 м, в сбросном канале — 0,3, в заливе Каховского вдхр. — 1,25 м. В 2011 г. вследствие постоянной продувки в ВО минерализация значительно снизилась (до 400 мг/дм³), а прозрачность увеличилась.

Количество бактериопланктона в ВО и Каховского вдхр. ранее было близким, максимальная численность — 3,69 и 4,12 млн. кл/см³ была отмечена в зоне наибольшего подогрева (отводящий канал) и в канале подпитки. В настоящее время она несколько снизилась.

Фитопланктон ВО в 1995 г. (исследования проводились в июле и ноябре) отличался достаточно высоким богатством — 104 вида из пяти отделов: синезелёных, криптофитовых, эвгленовых, зелёных и диатомовых. В массовом количестве в летний период развивалась субтропическая водоросль *Anabaenopsis raciborskii* Wołosz. В настоящее время количество видов снизилось, *A. raciborskii* не зарегистрирован, однако следует отметить, что наши исследования проводились в сентябре — октябре, а по данным 1995 г. осенью этот вид также не обнаруживался [6]. Численность и биомасса фитопланктона летом 1995 года достигали 549,4 млн. кл/дм³ и 57,99 мг/дм³, что соответствует IV степени «цветения» воды. В настоящее время эти показатели в ВО заметно снизились. Следует отметить также, что сохранились отличия состава фитопланктона техно-экосистемы и фонового водоёма — Каховского вдхр., и в самом ВО существует определенная гетерогенность пространственного распределения альгоценозов.

Видовой состав зоопланктона ВО и Каховского вдхр. в летний период 1995 года был небогат — всего 15 видов беспозвоночных [6]. Его численность и биомасса составляли 349,6 тыс. экз/м³ и 6,0 г/м³, доминировали ракообразные: по численности — веслоногие, по биомассе — ветвистоусые. В настоящее время численность возросла, а биомасса — снизилась (849,5 тыс. экз/м³ и 4,24 г/м³). Состав доминантов в водоёме остался практически без изменений.

Качественный состав микрофитобентоса заметно изменился по сравнению с 1995-м годом, главным образом за счёт отделов Cyanophyta и Cryptophyta, представители последнего в настоящее время не обнаружены. Биомасса осталась на том же уровне, а численность в 2011 г. снизилась более



4. Зависимость НОТ-разнообразия зоопланктона от температуры в период исследований в техно-экосистеме ЗАЭС и на участке Каховского водохранилища: 1 — HN, бит/экз.; 2 — НВ, бит/г.

чем втрое вследствие выхода из доминирующего комплекса мелкоклеточных водорослей класса *Normogoniophyceae*.

В целом качественные и количественные характеристики зообентоса ВО ЗАЭС по сравнению с показателями в 1995 г. существенно не изменились. Однако по данным исследований 1995 г. максимальную биомассу зообентоса ВО определяли крупные двустворчатые моллюски, их местообитания были достаточно локальны, в 2011 г. обнаружены не были.

В зооперифитоне ВО в 1995 г. было обнаружено 29 видов, в подводном канале — 26 и в отводящем — всего 9. В 2011 г., как и ранее, в ВО отмечены беспозвоночные-вселенцы *Cordilophora caspia* и *Urnatella gracilis*. В ВО по-прежнему отсутствуют *Gammaridae*, *Corophiidae* и *Dreissena*, встречающиеся в водоёме-водоисточнике. Общая биомасса составляла десятки и сотни граммов, а в настоящий период резко снизилась (не более 20 г/м²). Важно отметить, что в 1995 г. были проведены исследования эпифитона на тростнике, которые, в частности, показали присутствие дрейссены полиморфной в подводном канале и в районе продувки. В настоящее время, в связи с существенным изменением характера зарослей высших водных растений, количественное развитие эпифитона незначительно. Экологические особенности (вероятнее всего, высокая температура воды) в ВО привели к формированию в нём особенных, очень густых монодоминантных зарослей тростника обыкновенного, имеющих вид отдельных куртин.

Заключение

Таким образом, в 2011 г. по сравнению с 1995 г. в ВО ЗАЭС произошли изменения в структуре группировок гидробионтов, в частности показатели обилия фитопланктона снизились, а численность зоопланктона возросла. Однако для структурных показателей в пелагической подсистеме они не являются существенными. В наиболее консервативной донной подсистеме значительных изменений не произошло.

Полученные результаты, свидетельствующие об отсутствии коренных изменений в техно-экосистеме, позволяют говорить о наличии псевдоклиматического состояния. Однако при изменении характера техногенного воздействия оно может быть нарушено, что обуславливает необходимость постоянного гидробиологического мониторинга техно-экосистемы.

**

Наведено результати комплексних гідробіологічних досліджень водойми-охолоджувача Запорізької АЕС в умовах постійного продування в Каховське водосховище. Проведено оцінку довготривалих змін в підсистемах.

**

The results of complex hydrobiological researches of cooling pond of Zaporozhskaya NPP in the conditions of the permanent blowing (water change) of the Kakhovka reservoir are presented. Long-term changes in subsystems has been assessed.

**

1. *Баканов А.И.* Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем // Мониторинг биоразнообразия. — М., 1997. — С. 278—282.
2. *Водоросли: Справочник* / Под общ. ред. С.П. Вассера. — Киев: Наук. думка, 1989. — 608 с.
3. *Гидробиология* водоёмов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины. — Киев: Наук. думка, 1991. — 192 с.
4. *Звягинцев А.Ю., Мощенко А.В.* Морские техноэкосистемы энергетических станций. — Владивосток: Дальнаука, 2010. — 343 с.
5. *Иванова М.Б.* Изучение воздействия абиотических факторов среды на развитие гидробионтов в озерах и значение сравнительно-лимнологических исследований // Продукционно-гидробиологические исследования. — Л.: Наука, 1987. — С. 35—44.
6. *Калиниченко Р.А., Сергеева О.А., Протасов А.А., Сеницына О.О.* Структура и функциональные характеристики пелагических и контурных группировок гидробионтов в водоёме-охладителе Запорожской АЭС // Гидробиол. журн. — 1998. — Т. 32, № 1. — С. 15—25.
7. *Катанская В.М.* Растительность водохранилищ-охладителей тепловых электростанций Советского Союза. — Л.: Наука, 1979. — 279 с.
8. *Киселев И.А.* Методы исследования планктона // Жизнь пресных вод. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1953. — Т. 4. — С. 183—225.
9. *Кузнецов С.И., Дубинина Г.А.* Методы изучения водных микроорганизмов. — М.: Наука, 1989. — 288 с.
10. *Макрофиты* — индикаторы изменений природной среды / Под ред. К.М. Сытника, С. Гейны. — Киев: Наук. думка, 1993. — 435 с.
11. *Методи гідробіологічних досліджень поверхневих вод* / За ред. В.Д. Романенка. — К.: Логос, 2006. — 408 с.
12. *Песенко Ю.А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. — М.: Наука, 1982. — 287 с.
13. *Протасов А.А.* Распространение *Urnatella gracilis* Leidy в связи со сбросами подогретых вод // Вестн. зоологии. — 1996. — № 4—5. — С. 35—38.
14. *Протасов А.А.* О структуре фундаментальной и прикладной гидробиологии. — Мор. экол. журн. — 2010. — Т. 9, № 3. — С. 5—13.
15. *Протасов А.А., Силаева А.А.* Контурные группировки гидробионтов в техно-экосистемах ТЭС и АЭС / Институт гидробиологии НАН Украины. — Киев, 2012. — 274 с.
16. *Растительность* и бактериальное население Днепра и его водохранилищ / Под ред. Н.В. Кондратьевой. — Киев: Наук. думка, 1989. — 232 с.
17. *Силаева А.А., Протасов А.А.* Структура сообществ дрейссены литоральной зоны Каневского водохранилища // Вестн. Тюмен. ун-та. — 2005. — № 5. — С. 112—115.
18. *Стандарт підприємства* СТП 0.03.088-2010. Порядок розробки регламенту гідробіологічного моніторингу водойми-охолоджувача, систем охолодження і системи технічного водопостачання АЕС з реакторами типу ВВЕР. — К., 2010. — 48 с.

19. *Техно-экосистема АЭС*. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / Под ред. А.А. Протасова. — Киев: Ин-т гидробиологии НАН Украины, 2011. — 234 с.
20. *Топачевский А.В., Масюк Н.П.* Пресноводные водоросли Украинской ССР. — Киев: Вища шк., 1984. — 333 с.
21. *Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprokaryota. 2nd Part: Oscillatoriales. — Heidelberg: Elsevier/Spektrum, 2005. — 759 p.
22. *Protasov A.A., Sinitsina O.O., Kolomiets A.V.* Use of the WaCo (Water Communities) package to process the hydrobiological samples and create the databases on zoology and algology (FoxPro) // Information retrieval systems in biodiversity research: Тр. ЗИН РАН. — 1999. — Т. 278. — С. 132.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 17.09.12