

УДК 591.524.12 : [574.65 : 621.311.25 (477.43)]

Ю. Ф. Громова, А. А. Протасов

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ  
ЗООПЛАНКТОНА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ  
ТЕХНОЭКОСИСТЕМЫ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС**

В работе приведены результаты исследований пространственного распределения зоопланктона в техноэкосистеме Хмельницкой АЭС. Установлено, что зоопланктон водоема-охладителя обладает значительным видовым богатством, его состав в целом является типичным для региона. Показана гетерогенность структуры и обилия зоопланктона на разных уровнях: всей техноэкосистемы, водоема-охладителя, подводящего и отводящего каналов и их участков, отдельных станций по глубине. Формированию неоднородности зоопланктона способствовали гидродинамические процессы, связанные с техногенной циркуляцией и ветровым воздействием, а также различия условий между водоемом-охладителем, подводящим и отводящим каналами, литоралью и пелагиалью, поступление зоопланктона из реки — притока водоема-охладителя.

*Ключевые слова:* зоопланктон, гетерогенность, техноэкосистема, водоем-охладитель, подводящий канал, отводящий канал, техногенная циркуляция, ветровое воздействие, пелагиаль, литораль.

В водной толще как среде обитания организмов планктона, как правило, отсутствуют резко выраженные градиенты, тем не менее определенная гетерогенность условий существует. Основные факторы среды — освещенность, давление, температура, плотность воды изменяются по вертикали. По горизонтали происходит перемещение водных масс, связанное с течением, существуют градиенты, определяемые влиянием берега [6, 11]. Неравномерность пространственного распределения планктона в континентальных водоемах была показана еще в первой половине XIX века [6].

Водные техноэкосистемы обладают своеобразными условиями среды, существенно отличающимися их от естественных водоемов [1, 8, 16, 24 и др.]. В водоемах-охладителях, подводящих и отводящих каналах создаются условия, способствующие формированию различного рода пространственных неоднородностей в структуре как пелагических, так и контурных группировок гидробионтов. Они могут иметь устойчивый характер. Например, в зонах постоянного сброса подогретых вод и водозабора охлаждающих систем, как правило, формируются сообщества разного состава и структуры. При различных внешних воздействиях, например, при разной ветровой ситуации или гидродинамической картине, гетерогенность планктона определя-

© Ю. Ф. Громова, А. А. Протасов, 2017

ется подвижностью водных масс. Гетерогенность зоопланктона в техноэкосистеме АЭС можно рассматривать на нескольких уровнях: техноэкосистемы в целом и ее элементов — водоема-охладителя, подводящего и отводящего каналов и их участков, а также отдельных станций по глубине.

Знание характера пространственного распределения планктона важно для установления его структуры и динамики, определения общего содержания планктона в толще воды и водоеме в целом [6]. Такие исследования в техноэкосистемах важны для прогнозирования процессов, которые могут протекать в естественных водоемах в условиях изменения климата.

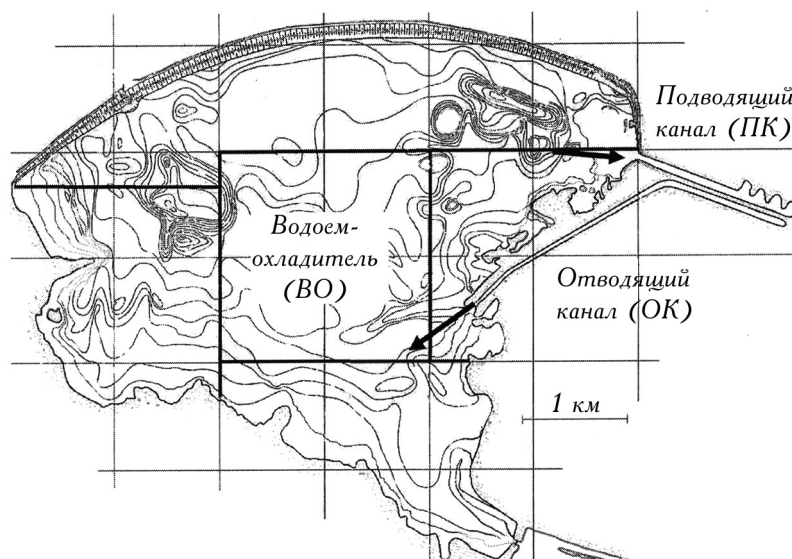
Целью исследования было выявление особенностей пространственного распределения зоопланктона и степени его гетерогенности в техноэкосистеме Хмельницкой АЭС.

**Материал и методика исследований.** Хмельницкая АЭС (ХАЭС) находится на границе Лесостепной зоны и западной части Украинского Полесья. Система охлаждения ХАЭС состоит из водоема-охладителя (ВО), подводящего (ПК) и отводящего (ОК) каналов. В ВО выделяли пять условных районов: северный (приплотинный), западный, центральный, восточный и южный (рис. 1). ВО ХАЭС представляет собой искусственно созданный водоем на р. Гнилой Рог (приток р. Горынь, бассейн р. Припяти) площадью около 20 км<sup>2</sup> и объемом 120 млн. м<sup>3</sup> [16]. Скорость течения в ПК при работе одного энергоблока составляет 0,1 м/с, двух — 0,2 м/с, в ОК — до 0,6 м/с. Различия температуры воды, например, при входе в ПК и при выходе из ОК в период исследований составляли от 0 до 8,5°С. Наибольшая зарегистрированная в ОК температура за период исследований составляла 37,5°С.

В работе рассмотрены результаты исследований зоопланктона в летний и раннеосенний сезон разных лет: VI.1998, VI.1999, VIII.2001, VI, VIII.2005, VII.2006, VII.2007, VIII, IX.2008, VI.2009, IX.2010, IX.2012, VII.2013, IX.2014, IX.2015 гг. Пробы отбирали планктонной сетью Апштейна (размер ячеек 80 мкм) методом вертикальных тотальных ловов и батометром Паталаса с глубинных горизонтов (всего 150 проб). Обработывали материал по общепринятым в гидробиологии методикам [7]. При описании таксономического состава использовали термин НОТ — низший определяемый таксон. В группе преобладающих вошли таксоны, составляющие ≥10% биомассы, доминирующих — ≥50% биомассы. Гетерогенность количественных показателей оценивали с помощью коэффициента вариации  $CV$  (%), для расчетов мер сходства применяли метод таксономического анализа Смирнова, коэффициенты Серенсена и Чекановского-Серенсена [9].

### *Результаты исследований*

В составе зоопланктона ВО ХАЭС обнаружено 120 НОТ (106 идентифицировано до вида), из них Rotifera — 53 (44), Copepoda — 23 (19), Cladocera — 43 (42), также отмечены велигеры *Dreissena*. Таксономическое богатство зоопланктона ВО ХАЭС сопоставимо с таковым в другом ВО Полесского региона — Чернобыльской АЭС, для которого указывается около 80 видов в доаварийный период и почти 120 НОТ в послеаварийный [24, 27]. Видовое



1. Схема системы охлаждения ХАЭС. На километровой сетке выделены границы районов ВО: северный, западный, центральный, восточный, южный (сверху вниз и слева направо). Стрелками указаны направления движения воды из ОК и в ПК.

богатство зоопланктона некоторых природных водоемов этого региона составляет: оз. Нобель — 79 [4, 10, 18], озер Шацкого комплекса — от 36 до 75 [23, 25], оз. Любязь — 34, в открытом побережье оз. Белого — 17 [17]. Высокое таксономическое богатство зоопланктона в водоемах-охладителях АЭС, вероятно, обусловлено не только разнообразием условий, но также длительностью исследований и количеством обработанного материала.

Некоторые водоемы региона обладают своеобразными элементами фауны. Так, оригинальность зоопланктона оз. Нобель отмечалась В. В. Полищуком [10], который сравнивал его состав и структуру с другими полесскими озерами (Шацкие, Червоное) и р. Припять. Своеобразие фауне планктона Шацких озер придает присутствие видов, тяготеющих к водам с повышенной минерализацией [25]. Редкие и инвазийные представители солоноватоводной Понто-Каспийской фауны были обнаружены в ВО Чернобыльской АЭС [24, 27]. Состав зоопланктона ВО ХАЭС в целом является типичным для региона, однако некоторые найденные здесь виды (*Brachionus plicatilis* Müller, *Calanipeda aquadulcis* Kritschagin, *Diaphanosoma dubium* Manuilova, *Diaphanosoma mongolianum* Ueno) в бассейне р. Припяти ранее зарегистрированы не были.

*Распределение зоопланктона в системе ВО — ПК — ОК.* Основные различия в условиях обитания организмов планктона в техноэкосистеме заключаются в наличии лотических условий в ПК и ОК, лентических — в охладителе с наличием техногенной циркуляции вод, повышенной температу-

## 1. Поверхностная температура воды (°C) в ВО, ПК и ОК ХАЭС

Дата	Количество работающих энергоблоков АЭС	ВО	ПК	ОК
VI.1998	0	16,9—18,0	19,2	17,4
VI.1999	0	23,9—25,2	24,5	25,5
VIII.2001	1	25,0—27,8	28,0	32,4
VI.2005	2	25,5—32,0	25,5	32,0
VIII.2005	2	19,0—31,0	24,1	31,0
VII.2006	2	22,0—29,0	28,0—28,5	37,2—37,5
VII.2007	2	22,3—30,0	25,0	30,0
VII.2008	0	21,0	23,0	21,0
IX.2008	1	15,6—19,0	15,8	19,0
VI.2009	2	23,8—28,5	23,0	28,5
IX.2010	1	19,8—25,5	19,7	26,7
VIII.2012	2	22,4—28,3	24,7	32,2—33,0
VII.2013	2	26,9—32,0	28,6	34,6
IX.2014	1	22,1—26,2	23,1	28,0
IX.2015	1	17,0—26,5	19,5—20,0	26,5

ры воды в ОК и некоторых районах ВО [16]. При остановке энергоблоков термические и гидродинамические условия выравниваются (табл. 1).

Сходство состава планктона между ВО, ПК и ОК было высоким — средние значения индекса Серенсена в разные периоды исследований составляли 0,53—0,85. Сходство преобладающих НОТ зоопланктона между ВО, ПК и ОК в периоды работы станции также было достаточно высоким (обычно > 0,50), во время прекращения циркуляции — заметно снижалось, что связано с изменением структуры зоопланктона в каналах. Так, в июле 2008 г. комплексы преобладающих НОТ в ВО, ПК и ОК были разными.

Значения индекса Чекановского-Серенсена, который применяли для оценки сходства распределения видов с учетом степени доминирования между отдельными элементами техноэкосистемы, значительно различались в разные периоды исследований, но чаще были невысокими. При расчете по численности средние значения индекса при сравнении ВО и ПК составляли 0,26—0,60, при сравнении ВО и ОК — 0,14—0,52, при сравнении ПК и ОК — 0,10—0,75, при расчете по биомассе — соответственно 0,14—0,56, 0,10—0,39 и 0,16—0,56.

Распределение обилия зоопланктона в системе ВО — ПК — ОК, оцениваемое с помощью коэффициента вариации ( $CV$ , %), было более неоднород-

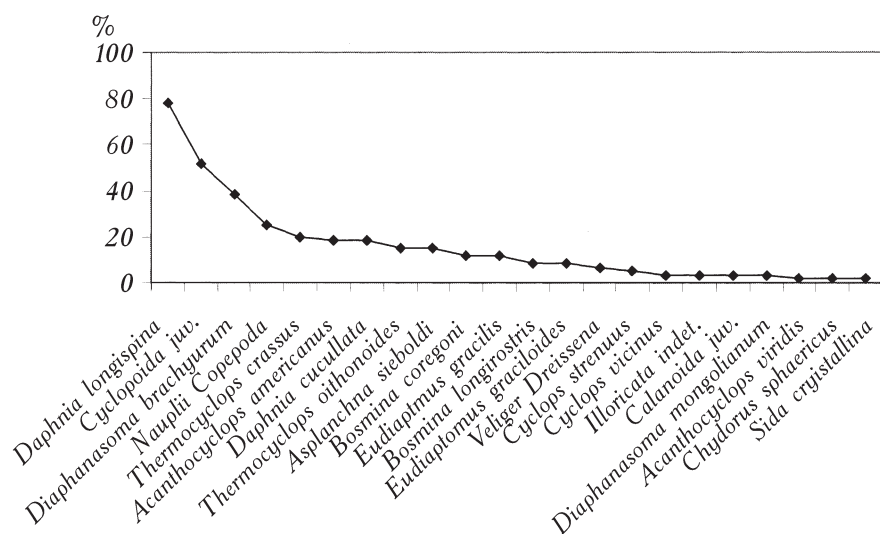
ным в периоды работы энергоблоков: 53,31—139,48 по численности и 77,55—141,10 по биомассе при работе одного энергоблока и 31,00—79,94 по численности и 25,18—121,91 по биомассе при работе двух. При остановке энергоблоков значения *CV* составляли соответственно 33,43—59,61 и 54,39—95,26. Таким образом, в условиях техногенной циркуляции и существования градиента температуры неоднородность распределения зоопланктона возрастала.

*Распределение зоопланктона в ВО.* Состав зоопланктона на разных станциях в пределах ВО был довольно сходным. Средние значения индекса Серенсена были высокими как в периоды остановки станции (0,68—0,73), так и в периоды работы одного (0,70—0,84) и двух энергоблоков (0,57—0,82). При этом состав преобладающих по биомассе таксонов зоопланктона в разных районах ВО варьировал. Общие преобладающие таксоны были характерны только для двух — трех районов, что свидетельствует о достаточно большой оригинальности состава преобладающего в водоеме комплекса. Всего за период исследований в состав преобладающего комплекса зоопланктона входило 22 НОТ или 18% от общего НОТ-богатства. Наиболее часто в зоопланктоне преобладали *Daphnia longispina* (O.F. Müller) и Cyclopoida juv. — более 50% средней встречаемости (рис. 2).

Можно выделить несколько групп преобладающих НОТ в соответствии с особенностями их пространственного распределения. В группу таксонов, которые в периоды массового развития преобладали в одном — пяти районах, т. е. в отдельные периоды распространялись по всей акватории ВО, входили *D. longispina*, Cyclopoida juv., *Diaphanosoma brachyurum* (Liévin), *Asplanchna sieboldi* (Leydig) и *Eudiaptomus gracilis* (G.O. Sars). Таксоны, преобладающие не более чем в четырех районах: *Daphnia cucullata* Sars и *Thermocyclops crassus* (Fischer), не более чем в трех: Nauplii Copepoda, *Acanthocyclops americanus* (Marsch), *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg), veliger *Dreissena*, *Cyclops strenuus* Fischer, не более чем в двух: *Bosmina coregoni* Baird, *Thermocyclops oithonoides* (Sars), *Bosmina longirostris* (O.F. Müller), *Cyclops vicinus* Ulanjanin, Illoricata indet., Calanoida juv., *D. mongolianum*, в одном районе — *Acanthocyclops viridis* (Jurine), *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller) и *Sida crystallina* (O.F. Müller).

Из 22 преобладающих таксонов семь входили в состав доминирующего комплекса (*D. longispina*, *D. brachyurum*, Cyclopoida juv., *A. americanus*, *D. cucullata*, *E. gracilis*, *A. viridis*). Из них лишь *D. longispina* входила в состав доминирующего комплекса в подавляющем большинстве периодов исследования и распространялась как доминант в одном — четырех районах ВО. Другие представители доминировали лишь в отдельные периоды и лишь в одном районе ВО.

Сходство распределения НОТ, оцениваемое с помощью индекса Чекановского-Серенсена (по показателям численности и биомассы с учетом сходства доминантов) было несколько ниже в периоды работы энергоблоков станции (0,35—0,65 по численности и 0,28—0,55 по биомассе), чем во время их остановки (соответственно 0,57—0,72 и 0,42—0,58).



2. Ранжированное распределение преобладающих НОТ зоопланктона по показателю средней встречаемости в районах ВО ХАЭС в летний и раннеосенний сезоны 1998—2015 гг.

Распределение показателей обилия зоопланктона по акватории ВО чаще было неоднородным. Значения *CV* в периоды работы станции изменялись в пределах 18,87—132,77 при расчете по численности и 34,78—113,48 при расчете по биомассе, более однородным было распределение обилия зоопланктона в периоды остановки станции — значение *CV* изменялось в пределах соответственно 11,74—50,66 и 18,12—89,98. Максимумы и минимумы численности и биомассы зоопланктона не были постоянно приурочены к определенным участкам водоема. Достоверной зависимости между средними значениями его численности в ВО и значениями *CV* не обнаружено. Однако отмечено снижение значений *CV* с увеличением средней по ВО биомассы (рис. 3). Таким образом, возрастание биомассы происходило не локально, в отдельных районах, а с большей вероятностью в водоеме в целом.

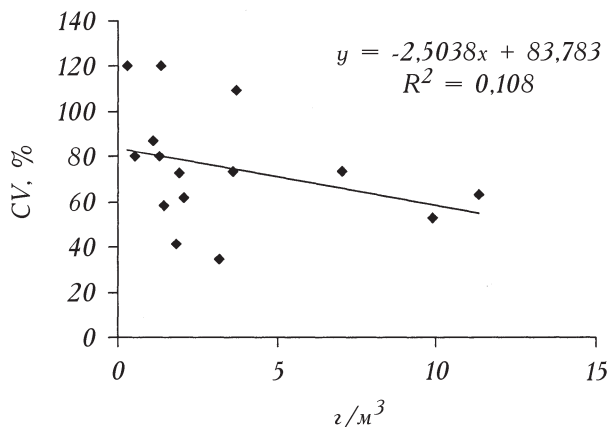
Распределение отдельных таксономических групп зоопланктона в ВО также было неоднородным, как и сообщества в целом. Из них более равномерно распределялись ракообразные, менее — коловратки и велигеры дрейссены. Последние часто обнаруживались только в некоторых районах [3]. Для отдельных групп зоопланктона была отмечена тенденция снижения гетерогенности распределения численности в ВО с ростом средней численности (рис. 4).

Значения *CV* по биомассе зоопланктона коррелировали со средней температурой воды в летний сезон, особенно без учета периодов отсутствия техногенной циркуляции (рис. 5). Таким образом, гетерогенность зоопланктона значительно возрастала при повышении средней температуры воды. В то же время, гетерогенность распределения самой температуры при ее увеличении снижалась (рис. 6). Таким образом, распределение зоопланктона и его пространственная неоднородность зависели не от собственно распреде-

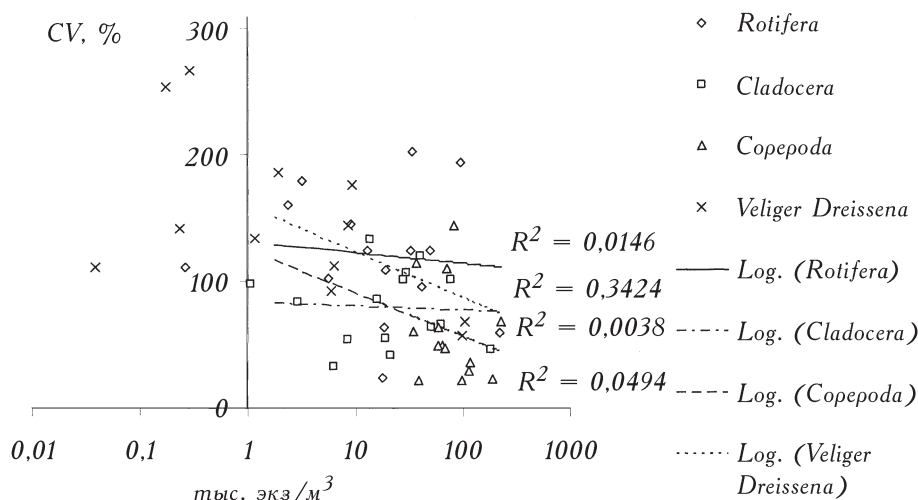
ления температуры, а скорее от гидродинамических факторов. Однако надо учитывать, что средняя температура зависела не только от техногенных факторов, но и от погодных условий, сезонности.

Одной из причин неоднородности распределения количественных характеристик зоопланктона по акватории ВО является техногенная циркуляция и ветровые течения [8, 12, 16]. В штилевую погоду образуется транзитный поток, направленный от выхода из ОК к входу в ПК. Он захватывает акваторию в восточном районе ВО и части центрального района. Ветровое воздействие существенно усложняет гидродинамическую картину в ВО. Траектории движения водных масс изменяются в зависимости от направления и скорости ветра [16].

При западном ветре часть транзитного потока следует от сброса к водозабору по кратчайшей траектории. На остальной акватории в это время частью потока, направленной к плотине, формируется круговорот с циклональной циркуляцией. Перемещение водных масс оказывает влияние и на рас-

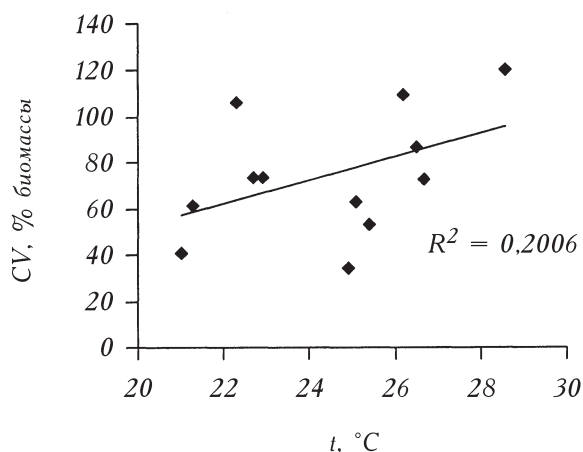


3. Зависимость между средней по водоему биомассой зоопланктона в ВО ХАЭС и ее коэффициентом вариации (CV) в разные периоды исследований.



4. Зависимость значений коэффициента вариации (CV) от средней численности таксономических групп зоопланктона в ВО ХАЭС в разные годы.





5. Зависимость значений коэффициента вариации ( $CV$ ) по биомассе зоопланктона от средней температуры воды ( $t$ ) в ВО ХАЭС.

ниже (14,69—64,88 тыс. экз/м<sup>3</sup>, 0,11—0,33 г/м<sup>3</sup>), что обусловило высокогетерогенное распределение обилия по водоему в целом ( $CV$  по численности —  $106,32 \pm 13,88$ , по биомассе —  $120,33 \pm 14,37$ ). Средняя индивидуальная масса зоопланктонтов в пределах потока (0,005 мг) была почти в два раза меньше, чем в пределах круговорота (0,009 мг). Это связано с преобладанием в круговороте крупных *D. longispina* и *E. graciloides*, тогда как в потоке помимо дафнии преобладали коловратки и молодь циклопов. Видовое разнообразие зоопланктона в потоке было ниже (1,98 бит/экз), чем в круговороте (2,38 бит/экз). Увеличение средней массы особи при возрастании разнообразия, определяемого по численности сообщества, подтверждает зависимость, продемонстрированную по другим периодам исследований [28].

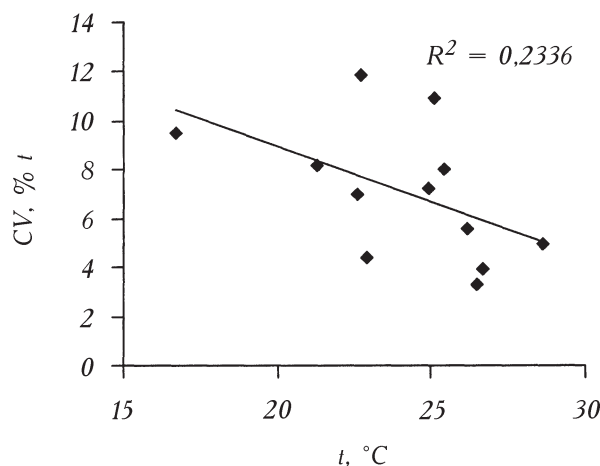
Восточный ветер вынуждает транзитный поток двигаться по самой длинной траектории. От места сброса он следует на запад, омывая юго-западный берег, а затем, изменяя направление к востоку, омывает северный берег и попадает к водозабору. В центральной части водоема образуется большая антициклональная циркуляция [16]. При восточном ветре скоростью 3,3 м/с 11.09.2015 г., когда большая часть водоема была вовлечена в транзитный поток антициклональной направленности, распределение обилия зоопланктона в потоке было достаточно равномерным ( $CV$  по численности —  $48,50 \pm 8,94$ , по биомассе —  $57,07 \pm 9,93$ ). По всему водоему диапазон изменения численности и биомассы зоопланктона был выше ( $CV$  соответственно  $128,34 \pm 12,64$  и  $60,60 \pm 9,48$ ). В центре антициклональной циркуляции минимальные количественные показатели отмечены у поверхности, они несколько увеличивались с глубиной. Так, в верхнем трехметровом слое воды обилие зоопланктона составляло 22,49 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 0,37 г/м<sup>3</sup>, на глубине 4,5 м оно увеличивалось до 27,50 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 0,46 г/м<sup>3</sup>, что, вероятно, связано с опусканием верхних слоев воды в центре антициклональной циркуляции. Более

распределение организмов планктона.

Так, 23.09.2010 г. при западном ветре скоростью 1,2 м/с распределение численности и биомассы зоопланктона в пределах транзитного потока было более неоднородным ( $CV$  по численности —  $81,88 \pm 21,85$ , по биомассе —  $98,68 \pm 23,47$ ), чем в пределах круговорота (соответственно  $57,13 \pm 14,02$  и  $53,30 \pm 13,46$ ). Численность и биомасса зоопланктона увеличивались по ходу потока от 37,30 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 0,31 г/м<sup>3</sup> до 211,97 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 1,10 г/м<sup>3</sup>. В круговороте эти показатели были



выраженную картину различий вертикального распределения зоопланктона наблюдали 16.VI.2005 г., когда в этой области также находился центр антициклональной циркуляции — численность и биомасса зоопланктона у поверхности составляли 31,99 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 1,17 г/м<sup>3</sup>, а на глубине 5 м увеличивались до 148,44 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 26,55 г/м<sup>3</sup>



6. Зависимость значений коэффициента вариации температуры воды ( $CV$ ,  $t$ ) от средней температуры воды ( $t$ ) в водоеме.

В центре циклональных циркуляций (восходящие токи воды) отмечено более высокое количественное развитие зоопланктона в поверхностных слоях. Так, в центральной области циклональной циркуляции, которая формировалась в западной части водоема при северо-западном ветре 20.VII.2006 г., численность зоопланктона изменялась от 224,16 тыс. экз/м<sup>3</sup> на глубине 1 м и 178,28 тыс. экз/м<sup>3</sup> на глубине 3 м до 78,44 тыс. экз/м<sup>3</sup> на глубине 5 м. В сентябре 2014 г. в центре циклональной циркуляции, которая формировалась в этой части водоема при северном ветре, численность зоопланктона от поверхности до глубины 6 м снижалась почти в четыре раза. За пределами центральных областей циркуляций, в циркуляционном и транзитном потоке, наибольшие показатели обилия зоопланктона, как правило, отмечали на глубине около 3 м. В условиях наиболее интенсивного перемешивания водных масс, что чаще всего происходило в зонах контакта ВО и каналов, распределение зоопланктона по глубине было достаточно равномерным. Так, 3.VIII.2001 г., на станции, расположенной при входе в ПК, обилие зоопланктона в пятиметровом слое воды изменялось в пределах 190,35—198,40 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 12,12—12,16 г/м<sup>3</sup>. Таким образом, гидродинамические процессы, связанные с техногенной циркуляцией и ветровым воздействием, оказывали влияние и на вертикальное распределение зоопланктона.

Необходимо отметить, что на общую картину распределения зоопланктона в ВО оказывает влияние зоопланктон южного района, который расположен таким образом, что его водные массы при господствующих западных ветрах мало участвуют в техногенной циркуляции. Кроме того, в эту часть водоема впадает р. Гнилой Рог, привнося своеобразные элементы фауны и в отдельные периоды оказывая влияние на количественные характеристики. Состав планктона южного района ВО отличался наибольшей оригинальностью — в большинстве случаев здесь отмечены высокие значения индекса Смирнова  $t_{xx}$  ( $> 100$ ), особенно в районе дамбы. Так, в сентябре 2015 г. ин-

декс Смирнова в южном районе был равен 189, а численность зоопланктона ( $577,01$  тыс. экз/м<sup>3</sup>) значительно (в 4—26 раз) превышала таковую в других районах ВО ( $75,09 \pm 12,33$  тыс. экз/м<sup>3</sup>).

*Распределение зоопланктона в пределах районов ВО.* В пределах районов на пространственное распределение зоопланктона существенное влияние оказывают различия между условиями литорали и пелагиали. В первой зоне, как правило, ниже прозрачность воды, более резко выражены суточные колебания температуры, своеобразные гидродинамические условия [6]. Таксономический состав зоопланктона литоральных участков имел высокую оригинальность, например,  $t_{xx} = 233$  (2006 г.), 80—169 (2013 г.) и 126—372 (2015 г.) по Смирнову. Видовое богатство зоопланктона литорали, как правило, было выше или таким же, как в пелагиали. Фаунистическая общность планктона литоральных и пелагических участков в 2006 и 2013 гг. была невысокой — значения индекса Серенсена составили соответственно 0,44 и 0,25—0,47, при снижении уровня воды в ВО в 2015 г. сходство группировок планктона этих участков было выше — 0,41—0,66. Обилие зоопланктона мелководных участков, по данным 2006 и 2013 гг., как правило, было выше пелагических. В 2015 г., в связи с аномально низким уровнем воды, значительные площади ранее закрытых мелководий были осушены, а численность и биомасса зоопланктона открытых мелководий были ниже или близки к таковым ближайших участков пелагиали (табл. 2). Таким образом, различия между зоопланктоном литоральных и пелагических участков ВО достаточно хорошо выражены. В маловодный год эти различия сглажены.

*Распределение зоопланктона в ПК и ОК.* Состав поступающего в ПК зоопланктона и выходящего из ОК был достаточно сходным — значения индекса Серенсена составляли 0,53—0,91. Довольно высокое сходство было характерно и для состава планктона самих каналов. В ПК значения индекса изменялись в пределах 0,65—0,92, в ОК — 0,50—0,78. Значения индекса Чекановского-Серенсена в разные периоды варьировали в широких пределах. При расчете по численности они изменялись в диапазоне 0,28—0,69 в ПК и 0,05—0,75 в ОК, при расчете по биомассе — соответственно 0,33—0,51 и 0,14—0,73.

Различия в количестве НОТ зоопланктона по длине каналов в одни периоды исследований не претерпевали существенных изменений, в другие — были значительными (например, в июле 2006 г. 15—25 НОТ в ПК и 16—28 в ОК). Зоопланктон ПК, ОК и их участков, как правило, был неоднороден по показателям обилия, численность и биомасса могли различаться на несколько порядков. Значения  $CV$  в ПК достигали  $95,56 \pm 28,42$  по численности и  $90,61 \pm 27,87$  по биомассе (IX.2014 г.), в ОК — соответственно  $109,10 \pm 24,22$  и  $83,92 \pm 22,08$  (IX.2010 г.). В отдельные периоды распределение обилия зоопланктона в ПК и/или ОК было достаточно равномерным. Так, в сентябре 2015 г. изменения численности и биомассы в каналах были невелики ( $34,59—47,68$  тыс. экз/м<sup>3</sup>,  $0,27—0,77$  г/м<sup>3</sup>), значения  $CV$  составили  $16,11 \pm 5,55$  по численности и  $37,12 \pm 11,62$  по биомассе. В целом, постоянных закономерных изменений показателей количественного развития зоопланктона по длине ПК и ОК отмечено не было. Динамичность зон концентрации планктона в каналах обусловлена, вероятно, турбулентностью потока, теп-

**2. Численность (тыс. экз/м<sup>3</sup>, над чертой) и биомасса (г/м<sup>3</sup>, под чертой) зоопланктона литоральных и пелагических участков в ВО ХАЭС**

Дата	Районы ВО	Биотоп		
		закрытое мелководье	открытое мелководье	пелагиаль
VII.2006	южный	—	<u>176,34</u>	<u>52,22</u>
			1,67	0,80
VIII.2013	западный	—	<u>1064,80</u>	<u>72,08</u>
			5,8	1,67
	восточный	<u>274,67</u>	<u>29,12</u>	<u>38,72</u>
		2,22	0,17	0,92
южный	—	<u>284,40</u>	<u>78,40</u>	
		0,86	0,91	
IX.2015	северо-западный	—	<u>106,84</u>	<u>83,80</u>
			0,61	1,85
	западный	—	<u>167,51</u>	<u>161,16</u>
			0,71	3,19
восточный	—	<u>59,49</u>	<u>49,34</u>	
		0,22	1,04	
южный	—	<u>178,82</u>	<u>577,01</u>	
		2,15	3,54	

ловым и механическим воздействием систем охлаждения, влиянием стоков очистных сооружений в ОК, а также взаимодействием с водными массами ВО в прилегающих к нему участках [2].

***Обсуждение результатов исследований***

Анализ многочисленных данных позволил И. А. Киселеву [6] сделать обобщение относительно хорологической структуры планктона в водоемах. Среди факторов, обуславливающих его неравномерное распределение, были отмечены ветер, приток воды в водоем, характер береговой линии, глубина водоема, наличие участков с проточностью, поверхностные и компенсационные течения при нагоне воды, температура, освещенность, неравномерное распределение солености, а также биотические факторы — роение, выедание, вертикальные и горизонтальные миграции и др. Впоследствии исследования вертикального и горизонтального распределения планктона подтвердили его значительную неоднородность [20—22, 26, 29, 30 и др.]. В частности, установлена сложная слоистость в распределении зоопланктона в глубоких стратифицированных озерах, связанная с выраженной вертикальной неоднородностью среды и экологией отдельных видов [13, 19 и др.]. Для Рыбинского водохранилища показано, что на его акватории закономерно изменяются не только показатели обилия зоопланктона,

но и распределение отдельных популяций, в частности, видов босминид [14]. Для озер Беларуси установлена большая неоднородность распределения зоопланктона не только между литоралью и пелагиалью, но и в самой литоральной зоне [5].

В технических водоемах, в частности в водоемах-охладителях электростанций, пространственная гетерогенность планктона изучена недостаточно. В основном исследования определялись подходом, когда выделяли две основные биотопические зоны с обитающими здесь организмами — зону вблизи сброса подогретых вод и «контрольную» в районе водозабора [1, 15, 24 и др.]. По данным О. А. Сергеевой [1], которая обобщила данные по зоопланктону ТЭС и АЭС Украины, в распределении видов зоопланктона по акватории ВО и по зонам с различным температурным режимом, некоторые отличия отмечены в зимнее время, в остальные периоды оно относительно равномерно. Различия видового состава, наблюдаемые в ряде ВО, связаны с привнесом в те или иные участки зоопланктонтов из водоисточника. Распределение обилия по акватории ВО заметно варьирует и зависит от целого ряда факторов, одним из которых является прохождение планктона через систему охлаждения ТЭС и АЭС, где он подвергается тепловому и механическому воздействию.

Гетерогенность планктона в техноэкосистеме можно рассматривать на нескольких условных уровнях масштабности — мега-, макро-, мезо- и микроуровне. Мегауровень позволяет определить черты сходства и отличия состава зоопланктона изученной техноэкосистемы относительно регионального. В целом близкий состав зоопланктона водоемов Полесья, обусловленный региональными физико-географическими и климатическими особенностями, имеет своеобразные элементы в отдельных водоемах. Своеобразие фауны планктона ВО ХАЭС (как и ВО ЧАЭС), в основном связано с присутствием некоторых представителей южной фауны, что закономерно в условиях повышенной температуры воды и минерализации. В то же время высокое видовое богатство в ВО ХАЭС относительно природных водоемов региона может быть обусловлено не только высоко гетерогенными условиями технического водоема, но и длительностью периода наблюдений. Мозаичность и динамичность зон концентрации планктона по горизонтали и вертикали, обусловленная различными причинами, характерна как для природных, так и техногенных водоемов региона.

Исследования на макроуровне позволили сравнить зоопланктон между отдельными элементами техноэкосистемы — ВО, ПК и ОК, которые различаются, прежде всего, температурным и гидродинамическим режимом. В этих элементах системы, связанных техногенной циркуляцией, отмечен в целом сходный фаунистический состав. Общность состава преобладающих таксонов больше в периоды работы станции, во время прекращения циркуляции структура зоопланктона перестраивается вплоть до полной смены преобладающих таксонов в каналах. Распределение его обилия в техноэкосистеме чаще неоднородное, особенно в периоды работы энергоблоков станции.

На мезоуровне рассматривали сходство и отличие зоопланктона внутри ВО между отдельными районами, зонами гидродинамических циркуляций, литоралью и пелагиалью, а также внутри каналов. Таксономический состав зоопланктона в ВО был довольно сходным. При этом состав преобладающих таксонов в разных районах ВО варьировал. Распределение обилия зоопланктона и отдельных таксономических групп по акватории ВО ХАЭС чаще было неоднородным. Более гетерогенным было распределение коловраток и велигеров дрейссены. Распределение зоопланктона в ВО было изменчивым во времени и в значительной степени определялось положением отдельных участков относительно формирующихся техногенных и ветровых циркуляционных потоков. Прохождение водных масс потока через систему охлаждения, по-видимому, влияло на снижение средней массы особи и видового разнообразия, определяемого по численности сообщества. Одной из причин пространственной неоднородности зоопланктона в ВО была также определенная обособленность южного района, водные массы которого слабо вовлечены в техногенную циркуляцию и испытывают влияние притока. Гетерогенность также прослеживалась между пелагическими и литоральными участками, которые имели невысокое сходство состава и различались уровнем количественного развития. Неоднородность в распределении обилия зоопланктона наблюдалась также внутри каналов, что прежде всего связано с турбулентностью потока и тепловым режимом.

Микрогетерогенность зоопланктона проявлялась в пределах отдельных станций по глубине. В ВО на его вертикальное распределение оказывали влияние гидродинамические процессы, вызванные ветровыми потоками и техногенной циркуляцией. В центральных областях антициклональных циркуляций обилие, как правило, с глубиной увеличивалось, в центре циклональных циркуляций — снижалось.

### *Заключение*

Исследования пространственного распределения зоопланктона в техноэкосистеме ХАЭС показали его гетерогенность на разных уровнях: региональном, всей техноэкосистемы, акватории водоема-охладителя, подводящего и отводящего каналов и их участков, отдельных станций по глубине.

Зоопланктон ВО ХАЭС обладает высоким таксономическим богатством (120 НОТ), которое не уступает или превышает таковое в природных водоемах Полесья. Помимо типичных представителей фауны региона в составе планктона ВО присутствуют редкие и инвазийные виды.

В техноэкосистеме ХАЭС, несмотря на неоднородность температурных и гидродинамических условий, формировался достаточно однородный по составу зоопланктон. Однако он был достаточно неоднородным по показателям обилия и структуре. Горизонтальное и вертикальное распределение зоопланктона в ВО носило динамичный характер и в значительной степени определялось положением отдельных участков водоема относительно формирующихся техногенных и ветровых циркуляционных потоков. В периоды работы энергоблоков АЭС распределение обилия зоопланктона чаще было более неоднородным, чем при отсутствии техногенной циркуляции. Формированию неоднородностей также спо-

собствовала определенная обособленность южного района водоема относительно гидродинамических циркуляций и поступление воды из притока. Гетерогенность зоопланктона пелагических и литоральных участков ВО выражена достаточно хорошо.

\*\*

*В роботі наведено результати досліджень просторового розподілу зоопланктону та його неоднорідності у техноекосистемі Хмельницької АЕС. Встановлено, що фауна планктону водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС відзначається значним видовим багатством і у цілому є типовою для регіону. Показана гетерогенність структури і рясності зоопланктону на різних рівнях: техноекосистеми, водойми-охолоджувача, підвідного і відвідного каналів та їх ділянок, окремих станцій по глибині. Формуванню неоднорідностей сприяли гідродинамічні процеси, пов'язані з техногенною циркуляцією і вітровими потоками, а також різниця умов між водоймою-охолоджувачем, підвідним і відвідним каналами, літораллю і пелагіаллю, надходження зоопланктону з притоки водойми-охолоджувача.*

\*\*

*The results of studies of spatial distribution of zooplankton and its heterogeneity in technoecosystem of the Khmelnytsky NPP is discussed. It was found that zooplankton of the cooling pond of Khmelnytsky NPP has considerable species richness, and on the whole is typical for the region. It is shown that the heterogeneity of the structure and abundance of zooplankton on different levels: the whole technoecosystem, cooling pond, inlet and outlet channels and sites, the individual stations on the depth. The formation of zooplankton irregularities contributed to the hydrodynamic processes associated with man-made circulation and wind flow, as well as differences in conditions between the cooling pond, inlet and outlet channels, littoral and pelagial, zooplankton flow of the tributary river of the cooling pond.*

\*\*

1. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины / Отв. ред. М. Ф. Поливанная. — Киев: Наук. думка, 1991. — 192 с.
2. Громова Ю.Ф., Протасов А.А. Зоопланктон каналов системы охлаждения Хмельницкой АЭС // Ядерная энергетика та довкілля. — 2015. — № 1. — С. 53—58.
3. Громова Ю.Ф., Протасов А.А. Многолетняя динамика и распределение велигеров *Dreissena* в водоеме-охладителе Хмельницкой АЭС и их роль в структуре зоопланктона // Гидробиол. журн. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 3—17.
4. Гулейкова Л.В. Состав и структура сообществ зоопланктона озера Нобель // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III Междунар. науч. конф., 17—22 сент. 2007 г., Минск — Нарочь. — Минск: БГУ, 2007. — С. 212—213.
5. Зоопланктон литоральной зоны озер разного типа. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 172 с.
6. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. — Л.: Наука, 1980. — Т. 2. — 440 с.

7. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод* / За ред. В. Д. Романенка. — К.: Логос, 2006. — 408 с.
8. Новоселова Т.Н., Громова Ю.Ф., Протасов А.А. Пространственная гетерогенность планктона в техно-экосистеме АЭС // Наук. зап. Терноп. пед. ун-ту. Сер. Біологія. — 2015. — № 3—4. — С. 506—509.
9. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. — М.: Наука, 1982. — 287 с.
10. Полищук В.В. К познанию зоопланктона озера Нобель // Гидробиол. журн. — 1991. — Т. 27, № 1. — С. 11—18.
11. Протасов А.А. Жизнь в гидросфере. Очерки по общей гидробиологии. — Киев: Академперіодика, 2011. — 704 с.
12. Протасов А.А., Новоселова Т.Н., Трохимец В.Н. и др. Состав и пространственное распределение планктона в водоеме-охладителе атомной электростанции // Биоразнообразие и устойчивое развитие: III Междунар. науч.-практ. конф., 15—19 сент. 2014 г.: материалы докл. — Симферополь, 2014. — С. 291—293.
13. Ривьер И.К. Состав и некоторые черты экологии зоопланктона зимой в глубоких стратифицированных озерах // Экология. — 2005. — № 3. — С. 201—214.
14. Ривьер И.К. Босмины водоемов бассейна Верхней Волги. — Ярославль: Филигрань, 2014. — 80 с.
15. Ривьер И.К., Гец Н.А. Зоопланктон Мошковичского залива, подогреваемого сбросными водами Конаковской ГРЭС // Биология внутр. вод. — 1971. — № 12. — С. 4—8.
16. Техно-экосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки / Под ред. А.А. Протасова. — Киев, 2011. — 234 с.
17. Управление трансграничным бассейном Днестра: суббассейн реки Припяти / под ред. А.Г. Ободовского, А.П. Станкевича, С.А. Афанасьева. — Киев: Кафедра. — 2012. — 448 с.
18. Экологическое состояние трансграничных участков рек бассейна Днестра на территории Украины — Киев: Академперіодика, 2002. — С. 330—343.
19. Dimante-Deimantovica I., Skute A., Skute R. Vertical variability of pelagic zooplankton fauna in deep Latvian lakes, with some notes on changes in ecological conditions // Est. J. Ecol. — 2012. — Vol. 61, N 4. — P. 247—264.
20. Jones R.I., Fulcher A.S., Jayakody J.K.U., Young J.M. The horizontal distribution of plankton in a deep, oligotrophic lake — Loch Ness, Scotland // Freshwater Biology. — 2006. — Vol. 33, N 2. — P. 161—170.
21. Marques S.C., Pardal M.A., Pereira M.J. et al. Zooplankton distribution and dynamics in a temperate shallow estuary // Hydrobiologia. — 2007. — Vol. 587. — P. 213—223.
22. Masson S., Pinel-Alloul B. Spatial distribution of zooplankton biomass size fractions in a bog lake: Abiotic and (or) biotic regulation? // Can. J. Zool. — 2011. — Vol. 76, N 5. — P. 805—823.
23. Nazaruk K.M., Khamar I.S. Zooplankton of some lakes of the Shatsk National Natural Park // Hydrobiol. J. — 2011. — Vol. 47, N 6. — P. 33—43.



24. *Pashkova O.V.* Zooplankton of the cooling pond of the Chernobyl NPS prior and after its removal from service // *Ibid.* — 2010. — Vol. 46, N 1. — P. 27—40.
25. *Pashkova O.V.* Pelagic zooplankton of the Shatsk Lakes as the indicator of their ecological state // *Ibid.* — 2012. — Vol. 48, N 3. — P. 24—38.
26. *Piontkovski S.A., Williams R., Peterson W.T. et al.* Spatial heterogeneity of the planktonic fields in the upper mixed layer of the open ocean // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* — 1997. — Vol. 148. — P. 145—154.
27. *Protasov A.A.* Communities of invertebrates of the cooling pond of the Chernobyl nuclear power station. Report 1. Communities of zooplankton, their composition and structure // *Hydrobiol. J.* — 2006. — Vol. 42, N 1. — P. 3—21.
28. *Protasov A.A., Guleykova L.V.* Zooplankton diversity in the cooling pond of the Khmelnytskyi NPS // *Ibid.* — 2011. — Vol. 47, N 3. — P. 30—38.
29. *Viljanen M., Holopainen A-L., Rahkola-Sorsa M. et al.* Temporal and spatial heterogeneity of pelagic plankton in Lake Pyhäselkä, Finland // *Boreal Env. Res.* — 2009. — Vol. 14. — P. 903—913.
30. *Voutilainen A., Jurvelius J., Lilja J. et al.* Associating spatial patterns of zooplankton abundance with water temperature, depth, planktivorous fish and chlorophyll // *Ibid.* — 2016. — Vol. 21, N 1—2. — P. 101—114.