

УДК (591.524.12:574.36) (477)

А. А. Протасов, Л. В. Гулейкова

РАЗНООБРАЗИЕ ЗООПЛАНКТОНА ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС

Приведены результаты исследований разнообразия (видового, таксономического) сообществ зоопланктона водоема-охладителя Хмельницкой АЭС после введения в строй второго энергоблока и вселения дрейссены. Установлены взаимосвязи разнообразия с другими структурными показателями в условиях водоема-охладителя атомной электростанции.

***Ключевые слова:** зоопланктон, водоем-охладитель, биоразнообразие, Хмельницкая атомная электростанция.*

Разнообразие является одним из важнейших показателей структуры сообществ [1, 5, 26]. Оно представляет собой двухкомпонентную систему, которая включает богатство разнопредставленных по обилию элементов [13, 15]. В гидробиологии разнообразие чаще всего связывают с видовым разнообразием, однако это всего лишь один из его аспектов. Исследования структуры сообществ гидробионтов, взаимосвязей между различными структурными показателями представляют особый интерес в водоемах с большой неоднородностью условий. К таковым можно отнести водоемы-охладители тепловых и атомных электростанций, в которых наблюдается в той или иной мере выраженный термический градиент от районов сброса подогретых вод к водозабору охлаждающей воды [3, 4]. В силу особенностей гидродинамики водоемов-охладителей, в частности постоянной циркуляции воды, организмы зоопланктона вовлекаются в общий круговорот вместе с охлаждающими конденсаторы станции водами, что способствует гомогенизации группировок. Тем не менее, население отдельных термических зон обладает определенным своеобразием состава, показателей обилия, динамики [9, 12, 21, 22].

Целью данной работы было выяснение взаимосвязи разнообразия зоопланктона с другими структурными показателями в условиях водоема-охладителя атомной электростанции.

Материал и методика исследований. Водоем-охладитель Хмельницкой АЭС (ХАЭС) расположен в северо-западной части Украины и представляет собой водохранилище на р. Гнилой Рог (бассейн р. Припяти). Площадь водоема составляет приблизительно 20 км², объем — 120 млн. м³. Особенностью современного периода существования водоема-охладителя ХАЭС является

© Протасов А. А., Гулейкова Л. В., 2011

сравнительно недавнее (2004 г.) введение в строй второго энергоблока, в связи с чем увеличилась и стала более постоянной техногенная нагрузка на водоем (повышение температуры, циркуляция вод). Кроме того, в водоем спонтанно (вероятно, в 2002—2003 гг.) вселился моллюск-фильтратор *Dreissena polymorpha* (Pallas) [10, 18].

При проведении исследований водоема-охладителя ХАЭС нами было выделено пять районов в самом водоеме (северный, западный, центральный, восточный, южный), а также, как самостоятельные районы, подводящий и отводящий каналы [6]. Отбор проб зоопланктона осуществляли по общепринятым гидробиологическим методикам [8, 11, 20] в летний период 2005 г. и посезонно в 2006 г. Анализ состава и распределения показателей обилия представлен в работе [6].

Пробы отбирали как на отдельных глубинах, так и тотальным ловом. Обработку данных проводили, используя программный пакет WaCo [19]. Видовое и таксономическое разнообразие рассчитывали по индексу Шеннона [13, 15, 16], в первом случае использовали показатели численности и биомассы, во втором — количество таксонов основных групп зоопланктона — коловраток, ветвистоусых, веслоногих ракообразных, а также велигеров дрейссены. Значения показателя «термической удаленности» (T/T_{max}) вычисляли как отношение температуры на станции исследования к максимальной температуре, отмеченной в водоеме в данный период исследований. Для описания зависимостей использовали метод огибающей кривой [7, 25].

Результаты исследований

Термические условия в водоеме-охладителе неоднородны в связи с постоянным поступлением из отводящего канала в восточный район водоема подогретой на 8—10°C воды (табл. 1). Использование показателя T/T_{max} позволило в относительных величинах выявить степень термического влияния подогретой сбросной воды АЭС на тот или иной район. Показатель T/T_{max} в самом высокотемпературном районе — отводящем канале, отличается от единицы потому, что приведены усредненные данные по всему каналу, на протяжении которого также наблюдалось определенное снижение температуры.

В составе зоопланктона за период исследований зарегистрировано 97 низших определяемых таксонов беспозвоночных (НОТ [2], преимущественно видов). В целом, видовое богатство зоопланктона водоема-охладителя ХАЭС в период исследований было на уровне других ранее исследованных водоемов-охладителей Украины. Так, в водоеме-охладителе Чернобыльской АЭС в доаварийный период было отмечено 70 видов зоопланктона [21]. Всего в водоемах-охладителях Украины обнаружено более 150 видов планктонных беспозвоночных [4, 14, 17]. Распределение видового богатства по группам было следующим: коловратки (Rotatoria) — 43 вида, веслоногие ракообразные (Copepoda) — 23, ветвистоусые (Cladocera) — 30, а также велигеры дрейссены (до настоящего времени в водоеме зарегистрирован только один вид этих моллюсков).

1. Средние за период исследований значения показателя «термической удаленности» (T/T_{max}) в отдельных районах водоема-охладителя ХАЭС

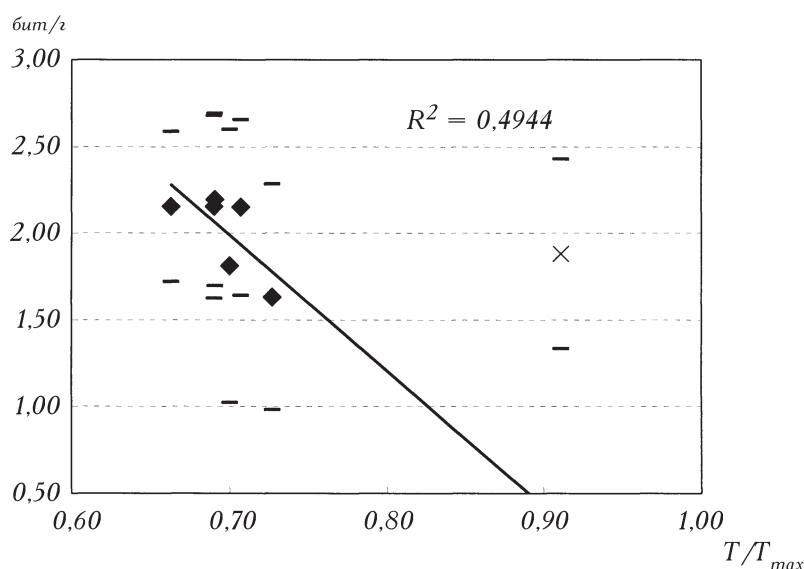
Районы	T/T_{max}	$\pm m$	$CV, \%$
Северный	0,673	0,025	16,291
Западный	0,659	0,025	14,380
Центральный	0,700	0,031	16,661
Восточный	0,727	0,023	10,134
Южный	0,691	0,023	11,465
Подводящий канал	0,703	0,024	15,463
Отводящий канал	0,911	0,050	17,370

П р и м е ч а н и е. $\pm m$ — ошибка средней арифметической; CV — коэффициент вариации.

Поскольку каждый из районов в течение всех сезонов сохранял определенный термический режим, можно поставить вопрос о постоянстве разнообразия, как показателя структуры сообществ зоопланктона в них. Видовое разнообразие зоопланктона, рассчитанное по численности, снижалось в полученном диапазоне значений T/T_{max} , максимальным было в центральном районе ($2,395 \pm 0,109$ бит/экз.), минимальным — в отводящем канале ($2,028 \pm 0,200$ бит/экз.). Разнообразие по биомассе снижалось в самом водоеме и подводящем канале при возрастании величин T/T_{max} , однако в отводящем канале эта закономерность не выдерживалась и значение разнообразия было выше ожидаемого — $1,879 \pm 0,173$ бит/г (рис. 1).

В целом, термический режим водоема зависел от сезонных изменений температуры, вслед за которой изменялось и видовое богатство зоопланктона, как это происходит и в естественных водоемах [8, 14]. Так, в северном районе в феврале 2006 г. при температуре воды около 6°C нами было отмечено 11 видов планктонных беспозвоночных, в июле при температуре около $25\text{--}26^\circ\text{C}$ — 20—25 видов. В южном районе при 8°C в феврале зарегистрировано 11 видов, в летний период при $25\text{--}28^\circ\text{C}$ — 18—25 видов. При самых высоких значениях температуры в отводящем канале было отмечено более 30 видов зоопланктона. Однако наибольшее видовое богатство — более 35 видов на станции — отмечено в средней части температурного диапазона.

Второй компонент видового разнообразия — выравненность — имел сложную зависимость от изменений температуры (рис. 2). В холодное время года выравненность при малом видовом богатстве была достаточно значительной, то есть отсутствовали выраженные доминанты как по численности, так и по биомассе. При повышении значений температуры на рисунке образуется обширное поле точек, которое может быть околотоупообразной кривой с максимумом между 20 и 25°C . Показатель выравненности здесь достигает значения $0,75$ при 23°C . В области максимальных величин температуры выравненность оказалась очень малой — около $0,30$. Таким образом, наблюдалась отрицательная зависимость между выравненностью зоопланктона по численности и температурой. Следует подчеркнуть, что



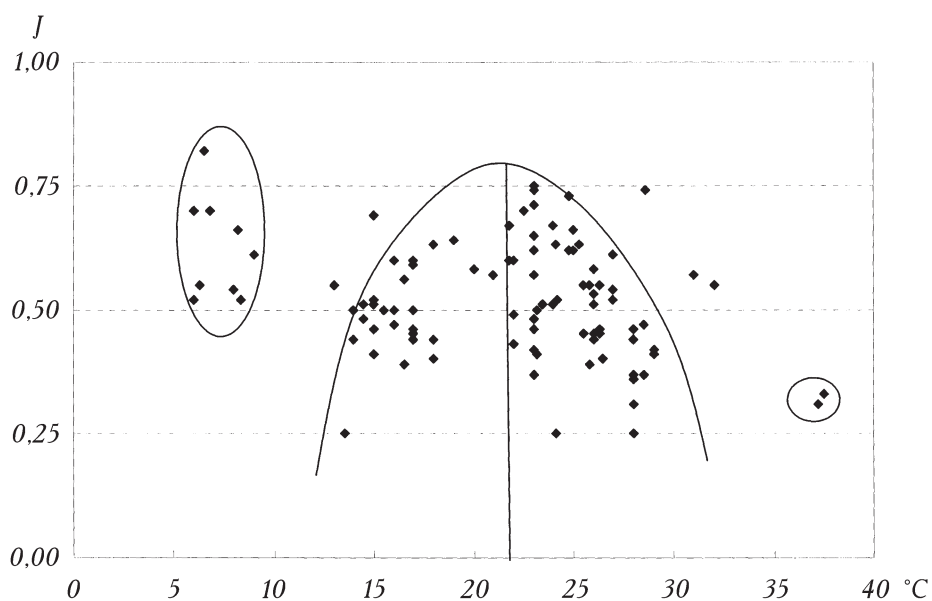
1. Изменение показателя разнообразия зоопланктона, рассчитанного по биомассе, в диапазоне значений «термической удаленности» T/T_{max} в водоеме-охладителе ХАЭС.

здесь присутствует как пространственный, так и временной фактор, поскольку температура изменялась не только во времени, по сезонам, но и в пространстве, в разных районах водоема-охладителя.

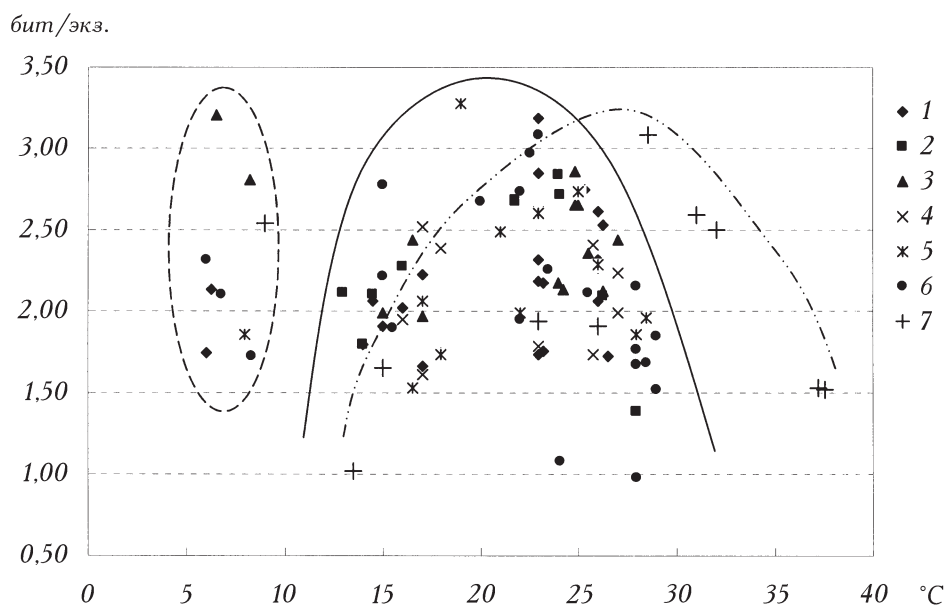
Видовое разнообразие зоопланктона в отдельных районах различалось и характер его изменения был сходным с распределением выравненности (рис. 3). Показатели разнообразия в зимний период можно выделить в отдельную область. Показатели разнообразия при температуре воды более 10°C на всех станциях, кроме отводящего канала, сформировали куполообразное поле с максимумом при температуре немного выше 20°C , а разнообразие зоопланктона в отводящем канале и вблизи сброса изменялось также унимодально, с максимумом при более высокой температуре — около 26°C .

Для разнообразия зоопланктона, рассчитанного по биомассе, была характерна достаточно сходная динамика, однако с большими колебаниями средних по водоему значений — от $1,588 \pm 0,143$ бит/г (апрель) до $2,655 \pm 0,071$ бит/г (август). Осенью разнообразие зоопланктона, рассчитанное по биомассе, в среднем по водоему снижалось. Коэффициент вариации CV был меньшим в августе и июле. В целом, между значениями CV разнообразия по численности и биомассе существовала слабая отрицательная корреляция — $r = -0,31$.

В силу малого количества групп, максимальное таксономическое разнообразие было невысоким — $1,585$ — $2,000$ бит/таксон. В диапазоне значений T/T_{max} оно изменялось таким образом, что поле точек имело существенное смещение к максимуму в зоне значений T/T_{max} около $0,75$. Такой ход изменения таксономического разнообразия был четко выражен в определенные сезоны, например в апреле. По данным июня и октября отмечено снижение

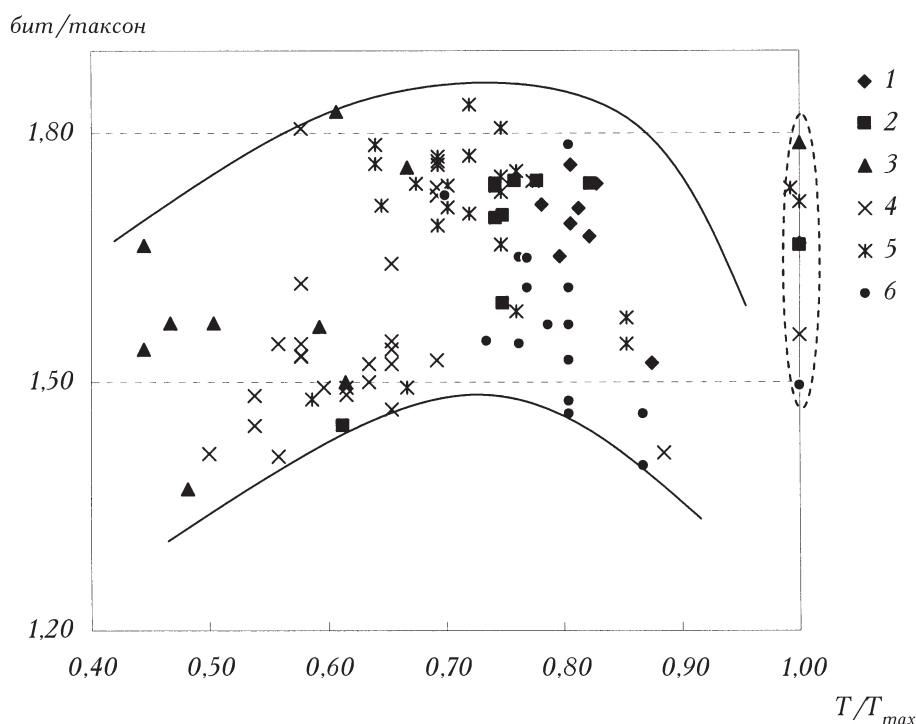


2. Зависимость показателя выравненности зоопланктона, рассчитанного по численности, от температуры в водоеме-охладителе ХАЭС.



3. Зависимость показателя видового разнообразия зоопланктона, рассчитанного по численности, от температуры в разных районах водоема-охладителя ХАЭС: 1 — северный район; 2 — западный; 3 — центральный; 4 — восточный; 5 — южный; 6 — подводящий канал; 7 — отводящий канал.

таксономического разнообразия в диапазоне значений T/T_{max} от 0,75 до 0,90. Таксономическое разнообразие в условиях максимальных температур было выше ожидаемого при экстраполяции зависимости основного поля то-



4. Изменение таксономического разнообразия зоопланктона в диапазоне значений «термической удаленности» T/T_{max} в водоеме-охладителе ХАЭС: 1 — июнь 2005 г.; 2 — август 2005 г.; 3 — февраль 2006 г.; 4 — апрель 2006 г.; 5 — июль 2006 г.; 6 — октябрь 2006 г.

чек (рис. 4): при ожидаемых значениях около 1,3, оно было от 1,5 до почти 1,8 бит/таксон.

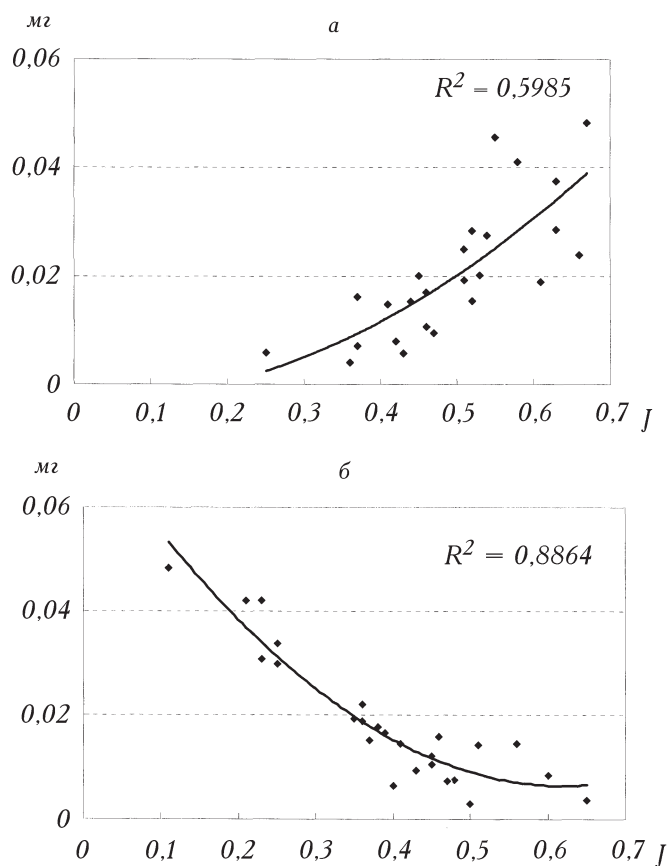
Изменение разнообразия как во времени, так и в пространстве отражает определенные структурные особенности сообществ, поэтому определение зависимостей между этими характеристиками вызывает интерес. Одним из важных показателей является размерная структура, которая может быть выражена как средняя масса особи или частное от деления биомассы на численность (w_{cp}).

При возрастании разнообразия и выравнивании по численности средняя масса особи также увеличивалась (рис. 5, а). В то же время во взаимосвязи показателя средней массы особи и выравнивании по биомассе отмечена обратная зависимость (рис. 5, б). В большей или меньшей степени аналогичные зависимости отмечены для всех сезонов, однако наиболее четко они прослеживались весной и летом.

Обсуждение результатов исследований

Оценка разнообразия стала неперенным элементом анализа структурных характеристик сообществ гидробионтов [1]. Однако зачастую лишь

констатируется тот или иной уровень численного показателя разнообразия, рассчитанного по определенному алгоритму. Тем не менее, установлены некоторые зависимости между показателями разнообразия и показателями структуры сообществ [1, 5, 16]. Имеющиеся уже довольно многочисленные данные свидетельствуют об обратной зависимости между показателями обилия, в частности биомассы, а также продукции и видового разнообразия [1, 5, 24]. Это происходит вследствие того, что общее увеличение биомассы определяется ростом таковой у небольшого количества видов, то есть происходит снижение выравненности. Также обратной



5. Зависимость средней массы особи от показателя выравненности (J) по численности (a) и биомассе ($б$) в зоопланктоне водоема-охладителя ХАЭС.

зависимостью связаны показатели разнообразия и средней биомассы ценопопуляции. Сообщества с бóльшим разнообразием состоят из меньших в среднем по биомассе ценопопуляций [15, 16]. Высказывалось мнение, что такая зависимость свидетельствует о пространственной биоценотической целостности группировок планктона, а её нарушение — наоборот, о случайной или сборной группировке [23].

Для изменений показателей разнообразия, рассчитанных по численности и биомассе, закономерности были как сходными, так и различались. Их различия зависели от выравненности. Изменения показателя разнообразия по биомассе в отводящем канале водоема-охладителя ХАЭС значительно отличались от остальных районов. Следует отметить, что связь показателя обилия с показателями разнообразия, рассчитанными по численности и/или по биомассе, может не быть сходной.

Это же касается и связи разнообразия с показателем средней массы особи. Как показано А. Ф. Алимовым [1], в сообществах с высоким разнообра-

зием преобладают популяции организмов с низкими значениями Р/В-коэффициента, который, в свою очередь, находится в обратной зависимости от размера (массы) особей. Поэтому увеличение средней массы особи сопровождается возрастанием разнообразия сообществ. Наши данные подтверждают эту модель в части взаимосвязи показателей средней массы особи и разнообразия, рассчитанного по численности. Если биомасса увеличивается более существенно, чем численность (возрастает средняя масса особи), то при этом возрастает и выравненность, то есть роль отдельных доминирующих видов не увеличивается. В то же время, увеличение средней массы особи происходит неравномерно во многих группах, не для всех видов, что приводит к снижению выравненности и разнообразия. Таким образом, подтверждается закономерность обратной зависимости между показателями разнообразия и биомассы.

Заключение

Термические условия в водоеме-охладителе создают гетерогенную среду для обитания гидробионтов. Как показали данные исследования, наибольшее разнообразие, что является показателем большой сложности сообществ [1], приурочено к средней части термоградиента. Это позволяет предполагать наличие определенных механизмов формирования структуры зоопланктона в гетерогенных условиях техногенного водоема. На основании этого может быть высказано предположение, что при увеличении термической нагрузки, например при введении в строй дополнительного энергоблока, структура сообществ зоопланктона будет упрощаться, что, в свою очередь, будет приводить к снижению её устойчивости.

В водоеме-охладителе ХАЭС, в отличие от других, разделенных направительной дамбой (водоемы Чернобыльской АЭС, Криворожской ГРЭС), последовательные по течению охлаждающейся воды от сброса к водозабору термические зоны не формируются. Тем не менее, использование показателя «термической удаленности» позволило выявить определенную биотопическую структурированность. Здесь, на наш взгляд, следует обратить внимание на то, что видовое разнообразие зоопланктона, аналогично с таксономическим, имело тенденцию к увеличению в средней части термического градиента. Таким образом, различные аспекты разнообразия сообществ тесно взаимосвязаны. Эти закономерности требуют дальнейших исследований.

**

Наведено результати досліджень різноманітності (видової, таксономічної) угруповань зоопланктону водойми-охолоджувача Хмельницької АЕС після введення в дію другого енергоблоку та вселення дрейсени. Встановлено взаємозв'язки різноманітності з іншими структурними показниками в умовах водойми-охолоджувача атомної електростанції.

**

Paper deals with results of study of zooplankton communities diversity of the Khmel'nitskiy NPP cooling pond after putting into operation of the second power-generating unit and

invasion of Dreissena. Interrelations between diversity and other structural characteristics under conditions of the nuclear power plant cooling pond have been stated.

**

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. — СПб.: Наука, 2000. — 147 с.
2. Баканов А.И. Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем // Мониторинг биоразнообразия. — М.: ИПЭЭ ОАН, 1997. — С. 278—282.
3. Безносков В.Н., Суздалева А.Л. Сукцессионное развитие экосистем техногенных водоемов // Антропогенное влияние на водные экосистемы. — М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2005. — 157 с.
4. Гидробиология водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций. — Киев: Наук. думка, 1991. — 192 с.
5. Гуляров А.М., Горелова Т.А. Корреляция между трофической структурой, видовым разнообразием и биомассой зоопланктона северных озер // Зоол. журн. — 1974. — Т. 54, № 1. — С. 25—33.
6. Гулейкова Л.В., Протасов А.А. Зоопланктон водоема-охладителя Хмельницкой АЭС в условиях увеличения техногенного влияния и вселения дрейссены // Гидробиол. журн.— 2009. — Т. 45, № 1. — С. 19—36.
7. Иванова М.Б. Влияние активной реакции и общей минерализации воды на формирование сообщества зоопланктона в озерах при приближении значений этих факторов к экстремальным // Тр. ЗИН РАН. — 1997. — Т. 272. — С. 71—86.
8. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. — Л.: Наука, 1969. — 658 с.
9. Кузнецова В.И. Зоопланктон водоема-охладителя Черепетской ГРЭС // Гидробиол. журн. — 1982. — Т. 18, № 5. — С. 45—58.
10. Марциновський В.П., Рудь О.Г., Гусаковська Т.М. Біорізноманіття гідробіонтів водойми-охолоджувача ХАЕС м. Нетішин // Екологія: наука, освіта, природоохоронна діяльність: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 2007 р., Умань. — К.: Наук. світ, 2007. — С. 46.
11. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В. Д. Романенка. — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
12. Мордухай-Болтовской Ф.Д. Проблемы влияния тепловых и атомных электростанций на гидробиологический режим водоемов (обзор) // Экология организмов водохранилищ-охладителей. — Л.: Наука, 1975. — 291 с.
13. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа фаунистических исследований. — М.: Наука, 1982. — 287 с.
14. Пугайко М.Л. Зоопланктон водоемов Европейской части СССР. — М.: Наука, 1984. — 208 с.
15. Протасов А.А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. — К.: Академперіодика, 2002. — 105 с.
16. Протасов А.А. Связь биоразнообразия со структурными характеристиками сообществ // Достижения современной биологии и биологическое образование: Тр. 2-й Междунар. науч. конф., Минск, 29—30 нояб. 2002 г. — Минск: Изд. центр Беларус. ун-та, 2002. — С. 109—113.

17. Протасов А.А. Состав и распределение зоопланктона водоема-охладителя Хмельницкой АЭС // Гидробиол. журн. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 35—44.
18. Протасов А.А., Силаева А.А., Гулейкова Л.В. и др. Об изменении гидробиологического режима водоема-охладителя Хмельницкой АЭС под действием техногенных и биогенных факторов // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы 3-й Междунар. науч. конф., 17—22 сент. 2007 г., Минск — Нарочь. — Минск: Изд. центр Белорус. ун-та, 2007. — С. 110—111.
19. Протасов А.А., Сеницына О.О., Коломиец А.В. Использование программного пакета WaCo (Water Communities) для обработки гидробиологических проб и создания баз данных по зоологии и альгологии (FoxPro) // Информационно-поисковые системы в зоологии и ботанике: Тез. докл. междунар. симп. — Тр. ЗИН РАН, 1999. — Т. 278. — С. 132.
20. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В. А. Абакумова. — Л.: Гидрометеопиздат, 1983. — 239 с.
21. Сергеева О.А. Сезонная динамика зоопланктона водоема-охладителя Чернобыльской атомной станции // Гидробиол. журн. — 1985. — Т. 20, № 1. — С. 32—36.
22. Сергеева О.А., Калиниченко Р.А., Ленчина Л.Г., Месяник Е.В. Влияние системы охлаждения тепловой электростанции на планктон // Там же. — 1989. — Т. 25, № 6. — С. 37—42.
23. Ghilarov A.M., Timonin A.G. Relations between biomass and species diversity in marine and freshwater zooplankton communities // Oikos. — 1972. — Vol. 23. — P. 190—196.
24. Huston M. A general hypothesis of species diversity // Amer. Natur. — 1979. — Vol. 113, N 1. — P. 81—101.
25. Ivanova M.B. Relationship between zooplankton development and environmental conditions in different types of lakes in the zone of temperature climate // Intern. Revue ges. Hydrobiol. — 1957. — Vol. 72, N 6. — P. 669—684.
26. Reed C. Species diversity in aquatic microecosystems // Ecology. — 1978. — Vol. 59, N 3. — P. 481—488.