

УДК (556.114.6:556.114.7:581.526.325) (282.247.3:285.33)

*П. Н. Линник*¹, *Т. П. Жежеря*¹, *Ю. С. Шелюк*²,
*В. А. Жежеря*¹

ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И РАЗВИТИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ВОДОХРАНИЛИЩАХ р. ТЕТЕРЕВ

Представлены результаты комплексного исследования абиотической и биотической составляющей экосистем Денишовского и Отсечного водохранилищ, расположенных на р. Тетерев. Основное внимание уделено рН, содержанию растворенного кислорода, взвешенных веществ, цветности воды, а также особенностям миграции и распределения Si, Al, Fe, Ti и Cu. Исследованы структура (видовое и внутривидовое разнообразие, численность, биомасса) и эколого-географическая характеристика фитопланктона. Показана связь между развитием фитопланктона в целом и его отдельных представителей в частности и рН, O₂ и Si.

Ключевые слова: кремний, железо, алюминий, медь, титан, взвешенные вещества, Денишовское водохранилище, Отсечное водохранилище, р. Тетерев, фитопланктон.

Распределение и особенности миграции химических элементов в поверхностных водных объектах следует рассматривать как важные характеристики их функционирования, определяющие уровень загрязнения и развитие биоты, что определяет качество воды. Особого внимания заслуживает изучение сосуществующих форм химических элементов. На содержание, формы нахождения и особенности миграции многих из них в поверхностных водных объектах существенное влияние оказывает биота, в частности фитопланктон. Поэтому гидрохимические и гидробиологические исследования должны осуществляться по возможности в комплексе, дополняя друг друга.

Река Тетерев — основная водная артерия Житомирской области, протекающая через ряд городов областного и районного значений, а также большое количество поселков и сел. Благодаря сооружению ряда водохранилищ, она стала главным источником водных ресурсов. В то же время их использование неминуемо сопровождается антропогенным загрязнением. Изучение химических компонентов водохранилищ во взаимосвязи с биотической составляющей является важной и необходимой задачей для оценки их состояния.

© П. Н. Линник, Т. П. Жежеря, Ю. С. Шелюк, В. А. Жежеря, 2016

В настоящей работе изложены результаты исследования содержания, форм нахождения и особенностей миграции некоторых компонентов химического состава воды, а также основных закономерностей формирования и функционирования фитопланктона в водохранилищах р. Тетерев.

Материал и методика исследований. Исследованиями были охвачены нижний участок Денишовского и средний участок Отсечного водохранилищ.

Денишовское — крупное водохранилище, расположено в окрестностях сел Тригорье и Дениши (Житомирский район), имеет площадь 255 га и объем 12,95 млн. м³, является аккумулярующим и предназначено для сезонного регулирования объемов воды [1], используется как источник питьевой воды и в рекреационных целях. Отсечное водохранилище имеет площадь 320 га и объем 10,20 млн. м³ [1]. Водоохранилище создано для устранения дефицита водных ресурсов и является основным источником питьевой воды г. Житомира.

Для гидрохимических исследований пробы воды отбирали на протяжении 2012—2013 гг. на стационарных станциях из поверхностного (~ 0,5 м) и придонного (~ 0,3—0,5 м от дна) горизонтов (Денишовское водохранилище) или только из поверхностного (Отсечное) с помощью модифицированного батометра-бутылки [4]. Значения рН измеряли рН-метром рН-150МИ. Концентрацию растворенного кислорода определяли по методике Винклера, цветность воды — фотометрическим методом с использованием имитационной бихроматно-кобальтовой шкалы [15].

Для отделения взвешенных веществ (ВВ) пробы воды пропускали через мембранные фильтры «Супрог» (Чехия) с диаметром пор 0,4 мкм под давлением ~ 2 атм, создаваемым установкой УК 40-2М. Общую массу ВВ определяли по разности между массой фильтра со взвесью и массой самого фильтра, после высушивания до постоянного значения.

Концентрацию кремния и металлов в составе ВВ находили после мокрого сжигания фильтров со взвесью в смеси концентрированных серной и азотной кислот квалификации «х. ч.» и последующей гидротермальной обработки неразложившегося остатка взвеси в стальном автоклаве с тефлоновым тиглем-вкладышем в сильнощелочной среде [10].

Абсолютное и относительное содержание различных компонентов ВВ рассчитывали, используя результаты измерений концентрации взвешенного кремния ($Si_{взв}$), биомассы диатомовых водорослей и водорослей других отделов, а также общего содержания взвешенных веществ ($ВВ_{общ}$). Для расчета содержания ВВ минеральной природы ($ВВ_{мин}$) сначала рассчитывали содержание биогенного ($Si_{биог}$) и минерального ($Si_{мин}$) кремния. Концентрацию $Si_{биог}$ устанавливали, принимая во внимание биомассу диатомовых водорослей и учитывая влажность и содержание кремнезема в их сухом остатке [2, 19]. Содержание $Si_{мин}$ рассчитывали по разнице между общим содержанием $Si_{взв}$ и $Si_{биог}$. Содержание $ВВ_{мин}$ рассчитывали по формуле: $ВВ_{мин} = (a \times 2,14) \times 1,76$, где a — концентрация $Si_{мин}$ в 1 дм³ воды, мг/дм³, 2,14 — коэф-

коэффициент для пересчета концентрации Si на содержание SiO₂, 1,76 — коэффициент для пересчета концентрации SiO₂ в составе минеральной взвеси на содержание ВВ с учетом среднего относительного содержания SiO₂ в составе минералов (56,7%). Содержание кремнеземной взвеси биогенного происхождения (SiO_{2(биог)}) рассчитывали по формуле: $SiO_{2(биог)} = b \times 2,14$, где b — концентрация Si_{биог} в 1 дм³ воды, мг/дм³, 2,14 — коэффициент для пересчета концентрации Si на содержание SiO₂. Содержание ВВ, представленных фитопланктоном, за исключением диатомовых водорослей, устанавливали по биомассе (в пересчете на сухой остаток) [19]. Содержание взвешенных веществ органического происхождения (ВВ_{орг}) (детрит и зоопланктон) рассчитывали по разнице между ВВ_{общ} и их содержанием в составе выше упомянутых компонентов:

$$ВВ_{орг} = ВВ_{общ} - ВВ_{мин} - SiO_{2(биог)}.$$

Объединение детрита и зоопланктона в одну группу взвешенных веществ связано с отсутствием данных по биомассе зоопланктона. Концентрацию металлов в составе лабильной фракции, которая включает содержание их гидратированных ионов, гидроксокомплексов и, возможно, слабоустойчивых комплексов с природными органическими лигандами, определяли непосредственно в фильтрате воды до ее УФ-облучения. Общее содержание растворенной формы металлов определяли после облучения в течение 2,0—2,5 ч в кислой среде при pH ≈ 1,5 с добавлением 30%-ного раствора H₂O₂ [15].

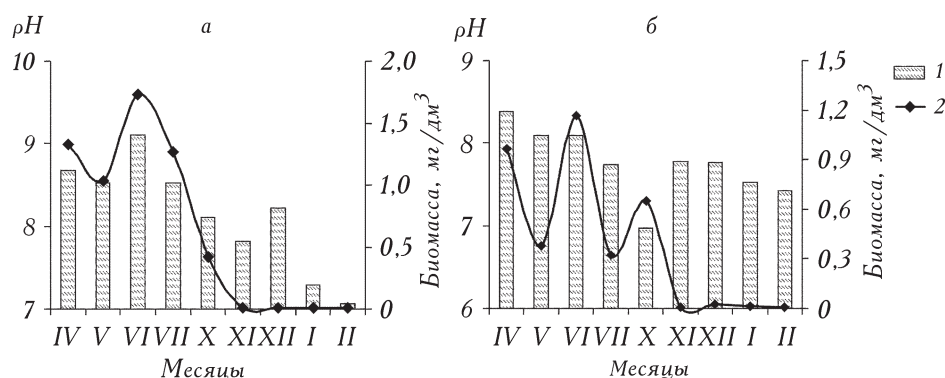
Исследования распределения металлов среди комплексных соединений с растворенными органическими веществами (РОВ) различной химической природы проводили методом ионообменной хроматографии [11]. Распределение соединений растворенного кремния по знаку заряда и молекулярной массе устанавливали методами ионообменной и гель-хроматографии согласно [9].

Содержание алюминия, железа, титана и кремния в фильтратах воды, в составе ВВ и отдельных фракциях, полученных с помощью ионообменной и гель-хроматографии, определяли фотометрически с использованием соответственно реагентов хромазуrola S, о-фенантролина, хромотроповой кислоты и метол-сульфитной смеси [15, 18], содержание меди — хемилюминесцентным методом [26].

Для исследований фитопланктона пробы воды объемом 0,5—1,0 дм³ отбирали с поверхностного и придонного горизонтов и обрабатывали в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками [14]. Для идентификации водорослей использовали отечественные и иностранные определители с учетом «Algae of Ukraine» [21]. Видами-доминантами считали вид и внутривидовые таксоны, биомасса или численность которых составляли не меньше 10% суммарных.

Результаты исследований и их обсуждение

Особенности химического состава исследуемых водохранилищ. Значение pH воды в Денишовском и Отсечном водохранилищах колебалась в широ-



1. Сезонные изменения значения pH (1) и биомассы фитопланктона (2) поверхностного (а) и придонного (б) горизонтов Денишовского водохранилища, 2012—2013 гг.

ких пределах — от 6,97 до 9,10. В обоих случаях максимальные значения отмечены в весенне-летний сезон. В придонном слое воды они были ниже, чем в поверхностном. Возрастание pH в поверхностном слое весной и летом связано, прежде всего, с развитием фитопланктона (рис. 1, а), что подтверждается существованием положительной корреляционной связи между pH и биомассой фитопланктона, для Денишовского и Отсечного водохранилищ значения коэффициента корреляции были соответственно 0,87 и 0,55. В придонном слое воды подобной связи не обнаружено (рис. 1, б). Наибольшие значения (9,10) отмечены в поверхностном слое Денишовского водохранилища в июне 2012 г. В осенне-зимний период значения pH снижались как в поверхностном, так и придонном слоях.

Содержание *растворенного в воде кислорода* в исследуемых водохранилищах изменялось в диапазоне 3,2—17,5 мг/дм³. Минимальное отмечено в придонном слое воды летом и осенью, соответственно 3,3 и 3,2 мг/дм³ (34,6 и 33,0% насыщения), что вызвано расходами кислорода на окисление накопившихся органических веществ. В поверхностном горизонте воды водохранилищ содержание растворенного кислорода колебалось в пределах соответственно 9,3—16,0 и 9,8—17,5 мг/дм³ (71,0—184,0 и 92,6—127,1% насыщения). В Денишовском этот показатель возрастал в весенне-летний период, во время массового развития фитопланктона. Следует отметить, что в поверхностном слое обоих водохранилищ даже в зимний период существенного дефицита кислорода не было, а в декабре 2012 г. в Денишовском и Отсечном насыщение составляло соответственно 117,1 и 127,0%. Это было обусловлено поздним ледоставом и продолжительной инвазией, связанной с постепенным снижением температуры, которое приводит к увеличению растворимости кислорода и замедлению процессов окисления органических веществ.

Цветность воды (опосредованный показатель содержания в ней гумусовых веществ (ГВ)) в Денишовском и Отсечном водохранилищах изменялась соответственно в пределах 13,8—44,0 и 10,0—33,2°Сг-Со-шкалы. Максимальные значения отмечены зимой 2013 г., что может быть связано как с процессом гумификации в самой водной толще, так и с поступлением ГВ со стоком

с водосборной площади. Влияние латерального стока на содержание ГВ и некоторых биогенных элементов в водных объектах ощутимо, если этому способствуют соответствующие погодные условия — чередование оттепелей с заморозками при наличии снежного покрова и отсутствии заметного промерзания грунта [13, 16]. В свою очередь, возрастание цветности воды и, следовательно, содержания в ней ГВ, несомненно влияет на формы нахождения металлов за счет их связывания в комплексы.

В поверхностных водах важную роль в миграции химических элементов играют *взвешенные вещества*, которые также влияют и на их формы нахождения. Содержание ВВ в воде Денишовского и Отсечного водохранилищ находилось в пределах соответственно 0,55—14,79 и 1,13—15,35 мг/дм³. Согласно проведенным расчетам, преобладали ВВ органической природы, представленные детритом и, возможно, зоопланктоном. Относительное содержание ВВ_{орг} составляло 3,8—96,2%, в среднем 74,9% ВВ_{общ} (табл. 1). Доля ВВ минеральной природы также колебалась в аналогичных пределах, однако не превышала в среднем 23,3%. Относительное содержание ВВ, содержащих SiO_{2(биог)}, не превышало 0,64%, а сухая масса фитопланктона без диатомовых водорослей — 7,96% ВВ_{общ}. Таким образом, ВВ в исследуемом водохранилище имеют преимущественно органоминеральный характер с преобладанием в их составе детрита.

К числу важных биогенных элементов наряду с азотом, фосфором и железом принадлежит *кремний*. Он в наибольших количествах ассимилируется диатомовыми водорослями. Общее содержание кремния (Si_{общ}) в воде Денишовского и Отсечного водохранилищ находилось в пределах соответственно 1,6—7,5 и 2,2—5,7 мг/дм³. При этом концентрация растворенного кремния (Si_{раств}) колебалась соответственно от 1,5 до 7,4 и от 2,0 до 5,6 мг/дм³, а Si_{взв} — от 0,06 до 0,91 и от 0,04 до 0,88 мг/дм³. Следовательно, в исследованных водохранилищах кремний мигрирует преимущественно в растворенной форме, относительное содержание которой составляет соответственно 68,3—99,1 и 74,7—99,2% Si_{общ}.

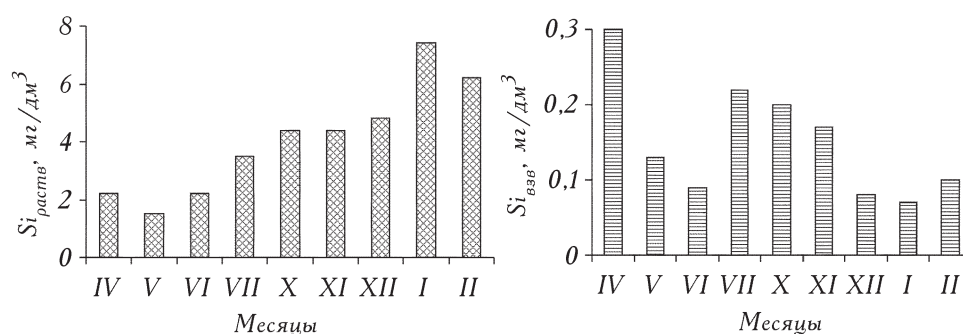
В поверхностном слое воды Денишовского водохранилища концентрация Si_{раств} весной снижалась, а с середины лета она увеличивалась и достигала максимальных значений в зимний период (рис. 2). Изменение биомассы диатомей на протяжении года свидетельствует об их влиянии на распределение кремния среди сосуществующих форм (рис. 3). Так, весеннее увеличение их биомассы способствовало изъятию из воды Si_{раств}, при этом возрастало содержание Si_{взв}. В зимний период, когда интенсивность развития водорослей снижалась, потребление Si_{раств} сводилось к минимуму, в результате содержание Si_{взв} за счет биогенной составляющей также уменьшалось, что в конечном итоге отражалось на общем содержании Si_{взв}. Поэтому зимой Si_{взв} имеет преимущественно минеральное происхождение (см. рис. 2 и 3). Подобным образом происходит миграция кремния и в Отсечном водохранилище.

Извлечение из толщи воды Si_{раств} диатомовым планктоном является не просто его ассимиляцией, в его основе лежит процесс трансформации, то есть преобразования сосуществующих форм кремния — растворенной во

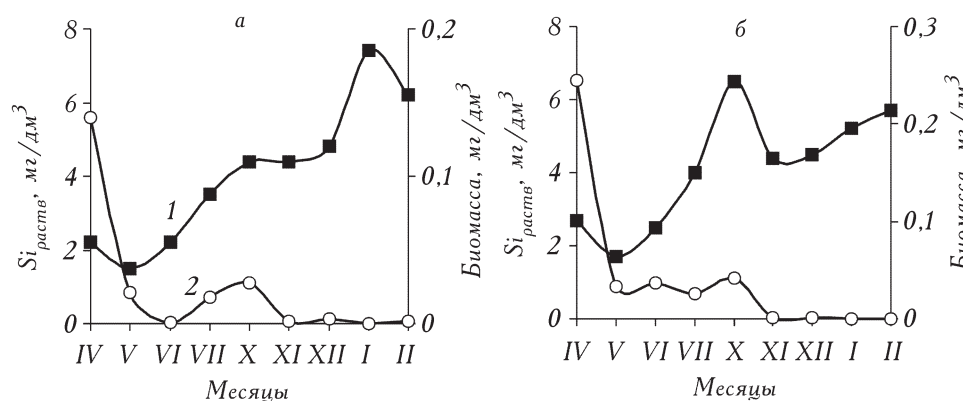
1. Содержание ВВ и их основных компонентов в воде Денишовского водохранилища

Дата отбора	Гори-зонт	Содержание ВВ _{общ} , мкг/дм ³	Содержание ВВ _{мин} , мкг/дм ³	Содержание SiO ₂ (биог), мкг/дм ³	Содержание фитопланктона, мкг/дм ³	Содержание ВВ _{орг} , мкг/дм ³	%	Биомасса фитопланктона, мкг/дм ³	%	Содержание ВВ _{орг} , мкг/дм ³	%
16.04.2012	П	2690	951	17,3	214,2	1507	0,64	214,2	7,96	1507	56,0
16.04.2012	А	12780	3384	30,0	130,0	9236	0,23	130,0	1,02	9236	72,3
02.05.2012	П	2840	486	2,6	183,0	2168	0,09	183,0	6,44	2168	76,3
02.05.2012	А	12210	2977	3,6	62,3	9167	0,03	62,3	0,51	9167	75,1
10.06.2012	П	6211	340	0,2	311,4	5559	0,00	311,4	5,01	5559	89,5
10.06.2012	А	8220	1691	5,0	203,0	6321	0,06	203,0	2,47	6321	76,9
14.07.2012	П	14790	826	2,6	225,0	13736	0,02	225,0	1,52	13736	92,9
14.07.2012	А	10700	1844	3,5	53,5	8799	0,03	53,5	0,50	8799	82,2
06.10.2012	П	10800	749	3,6	71,4	9976	0,03	71,4	0,66	9976	92,4
06.10.2012	А	3860	558	5,0	109,0	3188	0,13	109,0	2,82	3188	82,6
17.11.2012	П	5590	642	0,2	1,2	4947	0,00	1,2	0,02	4947	88,5
17.11.2012	А	13690	2492	0,2	1,3	11196	0,00	1,3	0,01	11196	81,8
15.12.2012	П	7919	301	0,4	1,0	7617	0,01	1,0	0,01	7617	96,2
15.12.2012	А	8610	1019	0,2	3,8	7587	0,00	3,8	0,04	7587	88,1
19.01.2013	П	649	264	0,0	2,1	383	0,00	2,1	0,32	383	59,0
19.01.2013	А	1540	793	0,0	1,9	745	0,00	1,9	0,12	745	48,4
23.02.2013	П	550	528	0,2	0,7	21	0,04	0,7	0,13	21	3,8
23.02.2013	А	6430	831	0,0	1,1	5598	0,00	1,1	0,02	5598	87,1

Примечание. Относительное содержание каждого компонента ВВ рассчитано к их общему содержанию; здесь и в табл. 2: П и А — соответственно по верхностный и придонный горизонты воды.



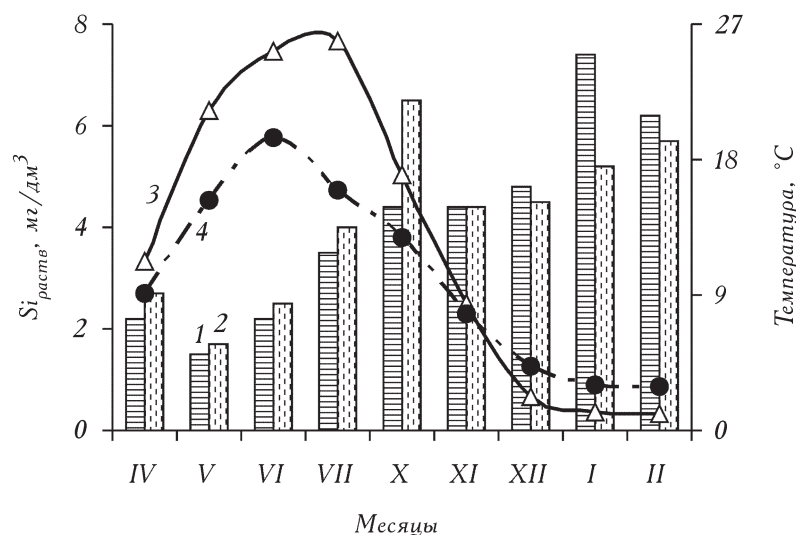
2. Изменения концентрации $Si_{раств}$ и $Si_{взв}$ в воде поверхностного горизонта Денишовского водохранилища.



3. Сезонные изменения концентрации $Si_{раств}$ (1) и биомассы диатомовых водорослей (2) в воде поверхностного (а) и придонного (б) горизонтов Денишовского водохранилища.

взвешенную. Об этом свидетельствуют также результаты исследований на других водных объектах [6].

В весенне-летний период, начиная с апреля, содержание $Si_{раств}$ у дна было выше, чем в поверхностном слое (рис. 4). С одной стороны, это может быть обусловлено его ассимиляцией фитопланктоном во время вегетационного периода в поверхностном слое, а с другой стороны — образованием термоклина и отсутствием вертикального перемещения водных масс, что ограничивает миграцию $Si_{раств}$ из придонного слоя в поверхностный. В ноябре 2012 г. при гомотермии и активном перемешивании водных масс его концентрация во всей водной толще была одинаковой. Однако начиная с декабря и в течение всей зимы вертикальное распределение концентрации $Si_{раств}$ приобрело несколько иной характер: более высокие концентрации отмечены в поверхностном слое. Вероятнее всего, в начале зимы это было обусловлено конвективным перемешиванием, когда, достигнув температуры максимальной плотности (4°C), более плотные слои воды с меньшей концентрацией $Si_{раств}$ опустились на дно. В последующие зимние месяцы его



4. Сезонные изменения концентрации $Si_{раств}$ (1, 2) и температуры воды (3, 4) Денишовского водохранилища, n и d — соответственно в поверхностном (1, 3) и придонном (2, 4) слоях.

содержание возрастало как в поверхностном, так и придонном слоях воды. В последнем случае это связано с разложением отмершего диатомового планктона или с поступлением $Si_{раств}$ из порового раствора донных отложений, а в первом, вероятней всего, причиной является подповерхностный (латеральный) сток [13].

Результаты исследований распределения $Si_{раств}$ среди фракций с различным знаком заряда, полученных с помощью ионообменной хроматографии, показали, что в воде Денишовского водохранилища преобладала его нейтральная фракция, относительное содержание которой колебалось в пределах 94,8—98,9% $Si_{раств}$. Методом гель-хроматографии установлено, что в этой фракции доминируют низкомолекулярные соединения с молекулярной массой, не превышающей 0,2 кДа. Таким образом, в воде Денишовского водохранилища $Si_{раств}$ находится преимущественно в виде мономерно-димерной формы кремниевой кислоты с нейтральным зарядом, которая является наиболее доступной формой кремния для усвоения гидробионтами [22].

Кроме биогенных элементов важную роль в функционировании водных экосистем играют металлы. Одни из них являются необходимыми для функционирования гидробионтов (Cu, Fe, Zn, Mn и др.) [3, 7, 12], тогда как другие обладают токсическим влиянием (Al, Cd, Pb, Be, Hg и др.) [8, 23]. Следует отметить, что не все сосуществующие формы металлов обладают токсичностью и являются биодоступными. Нахождение металла в составе высокомолекулярных комплексных соединений с РОВ и во взвешенных веществах снижает его потенциальную токсичность и биодоступность. Большое значение имеет также степень окисления (Fe, Cr, Mn, V и др.). Например, аква- и гидроксокомплексы Fe^{2+} оказывают токсическое влияние на рыб при кон-

центрации 5 мкг/дм^3 , тогда как эти же соединения железа со степенью окисления $+3$ не обладают токсическими свойствами.

Среди исследованных нами металлов *алюминий* наиболее токсичен для живых организмов. Его общее содержание в воде Денишовского и Отсечного водохранилищ находилось в пределах соответственно $34,0\text{—}193$ и $15,9\text{—}238 \text{ мкг/дм}^3$ (табл. 2). Для этого металла характерна преимущественная миграция в растворенном состоянии — в среднем $57,0\text{—}66,9\%$ $\text{Al}_{\text{общ}}$. Возрастание концентрации $\text{Al}_{\text{взв}}$ связано с увеличением содержания ВВ минерального происхождения, о чем свидетельствует наличие положительной корреляционной связи между этими показателями ($r = 0,85$, $p = 0,01$). Ранее нами было установлено наличие сильной корреляционной связи между концентрацией $\text{Al}_{\text{взв}}$ и содержанием ВВ в воде Килийской дельты Дуная, где относительное содержание минеральных ВВ превышает 90% [5]. В воде р. Тетерев из-за доминирования $\text{ВВ}_{\text{орг}}$ ($48,4\text{—}96,2\%$, см. табл. 1) корреляционная связь между $\text{ВВ}_{\text{общ}}$ и содержанием $\text{Al}_{\text{взв}}$ отсутствует, то есть их участие в трансформации $\text{Al}_{\text{раств}}$ в $\text{Al}_{\text{взв}}$ не было ощутимым. В растворенной форме алюминий на $30,5\text{—}59,2$, $8,3\text{—}9,3$ и $32,5\text{—}60,2\%$ находился в составе соответственно комплексных соединений с ГВ, белковоподобными веществами и углеводами. Содержание алюминия в составе лабильной фракции¹ составляло не более $0,0\text{—}14,8\%$ $\text{Al}_{\text{раств}}$. Таким образом, доля потенциально доступной для гидробионтов формы алюминия не превышала $14,8\%$ или $4,9 \text{ мкг/дм}^3$ и была ниже ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (36 мкг/дм^3). Это свидетельствует о важной роли РОВ, в частности ГВ и углеводов, в миграции алюминия в растворенном состоянии и его нахождении в воде исследуемых водохранилищ в нетоксичной для гидробионтов форме.

Железо. Общее содержание железа в Денишовском и Отсечном водохранилищах находилось в пределах соответственно $173\text{—}534$ и $67,4\text{—}586 \text{ мкг/дм}^3$ (см. табл. 2). В период с 1995 г. по 2006 г. на разных участках р. Тетерев оно изменялось в более широких пределах — $30\text{—}4550 \text{ мкг/дм}^3$, в среднем 230 мкг/дм^3 [17]. В исследуемых водохранилищах железо, в отличие от алюминия, мигрирует преимущественно во взвешенной форме. Относительное содержание $\text{Fe}_{\text{раств}}$ составляет в среднем $30,3\text{—}41,1\%$ $\text{Fe}_{\text{общ}}$. Корреляционная связь между концентрацией $\text{Fe}_{\text{взв}}$ и общим содержанием ВВ и их составляющих (минеральные частицы, фитопланктон, детрит) обнаружена не была. Предположительно такая связь может существовать между концентрацией $\text{Fe}_{\text{взв}}$ и содержанием минеральной взвеси, и между $\text{Fe}_{\text{взв}}$ и биомассой водорослей или детрита. Концентрация $\text{Fe}_{\text{раств}}$ находилась в пределах $0\text{—}262 \text{ мкг/дм}^3$, при этом характерной была его миграция в составе комплексных соединений с РОВ. Относительное содержание железа в составе комплексных соединений с ГВ составляло $29,0\text{—}95,8\%$ $\text{Fe}_{\text{раств}}$, а с белковоподобными веществами и углеводами — соответственно $0,4\text{—}15,5$ и $3,8\text{—}55,5\%$. Значительные пределы колебаний относительного содержания железа в составе комплексов с ГВ и углеводами обусловлены преимущест-

¹ Лабильная фракция — часть металла, извлекаемая из состава комплексных соединений с РОВ реактивом хромазуролом-S, из-за их слабого связывания.

2. Общее содержание исследуемых металлов ($M_{\text{общ}}$), их доля во взвешенной ($M_{\text{взв}}$) и растворенной ($M_{\text{раств}}$) формах в воде Денишовского и Отсечного водохранилищ (2012—2013 гг.)

Водные объекты	Горизонт	$M_{\text{общ}},$ мкг/дм ³	$M_{\text{взв}},$ мкг/дм ³	% $M_{\text{общ}}$	$M_{\text{раств}},$ мкг/дм ³	% $M_{\text{общ}}$
Алюминий						
Денишовское вДХр.	<i>n</i>	$\frac{34,0 - 131}{74,6}$	$\frac{14,5 - 47,0}{25,5}$	34,2	$\frac{15,1 - 84,0}{49,1}$	65,8
	<i>g</i>	$\frac{55,9 - 194}{121}$	$\frac{33,6 - 71,7}{51,8}$	43,0	$\frac{22,3 - 122}{68,7}$	57,0
Отсечное вДХр.	<i>n</i>	$\frac{15,9 - 238}{95,7}$	$\frac{6,7 - 161}{64,0}$	33,1	$\frac{11,8 - 61,3}{40,6}$	66,9
Железо						
Денишовское вДХр.	<i>n</i>	$\frac{173 - 534}{377}$	$\frac{146 - 444}{237}$	62,8	$\frac{26,6 - 234}{140}$	37,2
	<i>g</i>	$\frac{213 - 530}{365}$	$\frac{154 - 365}{215}$	58,9	$\frac{26,6 - 260}{150}$	41,1
Отсечное вДХр.	<i>n</i>	$\frac{67,4 - 586}{339}$	$\frac{65,2 - 508}{236}$	69,7	$\frac{0,0 - 262}{103}$	30,3
Медь						
Денишовское вДХр.	<i>n</i>	$\frac{9,3 - 19,0}{14,2}$	$\frac{0,6 - 1,8}{1,2}$	8,5	$\frac{8,7 - 17,2}{13,0}$	91,5
	<i>g</i>	$\frac{8,0 - 9,5}{8,6}$	$\frac{0,4 - 1,2}{0,9}$	10,5	$\frac{7,3 - 7,9}{7,7}$	89,5
Отсечное вДХр.	<i>n</i>	$\frac{8,7 - 14,9}{10,7}$	$\frac{0,3 - 1,7}{0,9}$	8,4	$\frac{7,9 - 13,2}{9,8}$	91,6
Титан						
Денишовское вДХр.	<i>n</i>	$\frac{20,8 - 32,4}{26,2}$	$\frac{3,8 - 16,8}{8,0}$	30,5	$\frac{12,8 - 25,0}{18,2}$	69,5
	<i>g</i>	$\frac{17,3 - 94,2}{45,8}$	$\frac{8,2 - 17,9}{13,2}$	28,8	$\frac{0,0 - 86,0}{32,6}$	71,2
Отсечное вДХр.	<i>n</i>	$\frac{0,3 - 27,5}{15,1}$	$\frac{0,2 - 21,9}{9,6}$	63,6	$\frac{0,0 - 11,5}{5,5}$	36,4

П р и м е ч а н и е. Над чертой — пределы колебаний, под чертой — среднее значение.

венно сезонными изменениями содержания этих групп РОВ в воде. Это подтверждается и результатами ранее проведенных исследований [11]. Относительное содержание лабильного железа находилось в пределах 0,0—47,4% $Fe_{\text{раств}}$, а его концентрация составляла 0,0—111,0 мкг/дм³. Лабильную фор-

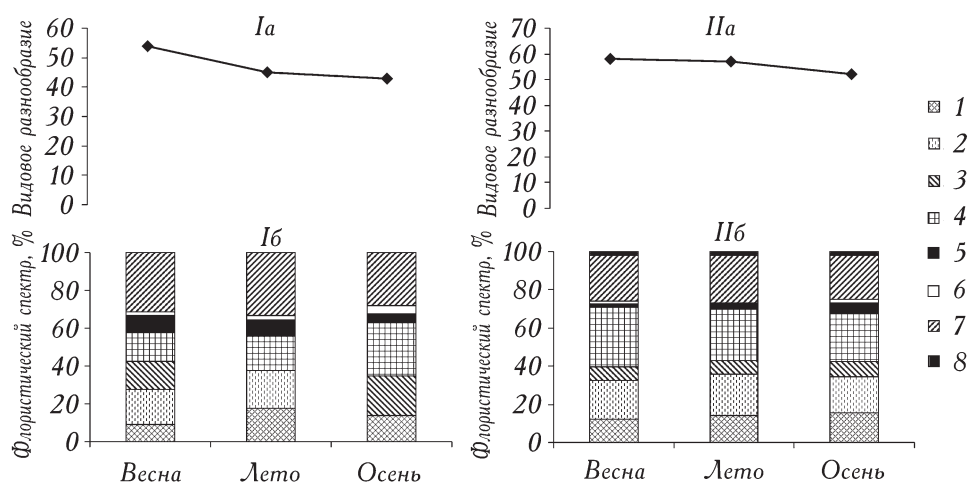
му металла можно отнести к потенциально биодоступной, поскольку в составе растворенной формы она наиболее подвижна. В исследуемых водохранилищах неоднократно отмечено снижение концентрации биодоступного железа до 0—3,7 мкг/дм³. Известно, что снижение до 1 мкг/дм³ и ниже приводит к угнетению развития водорослей [28].

Медь. В исследуемых водохранилищах содержание биодоступной формы меди не превышало 0,8 мкг/дм³, тогда как в составе комплексных соединений — 6,6—15,5 мкг/дм³. Это говорит о том, что, благодаря наличию в воде РОВ, ее миграция происходит преимущественно в растворенной форме — 89,5—91,6% $Cu_{\text{общ}}$ (см. табл. 2). Максимальная концентрация меди в растворенной и взвешенной формах не превышала соответственно 17,2 и 1,8 мкг/дм³ (см. табл. 2). В период с 1995 г. по 2006 г. содержание меди в р. Тетерев находилось в пределах 0,4—113,6 мкг/дм³ (в среднем 8,2 мкг/дм³) [17].

Титан до недавнего времени считался биологически инертным металлом. Исследования последних лет показали, что при нахождении в воде в виде наночастиц размером менее 100 нм он обладает пагубным воздействием на живые организмы. При этом, чем меньше размер, тем более выражено их вредное влияние [24, 25, 27]. В воде исследуемых водохранилищ общая концентрация титана находилась в пределах 0,3—94,2 мкг/дм³, содержание взвешенной и растворенной форм составляло соответственно 0,2—21,9 и 0,0—86,0 мкг/дм³ (см. табл. 2). Между концентрацией $Ti_{\text{взв}}$ и содержанием $VV_{\text{мин}}$ и $VV_{\text{общ}}$ существует корреляционная связь с r соответственно 0,61 и 0,59 при $p = 0,05$. Следовательно, $VV_{\text{мин}}$ определяют его миграцию во взвешенном состоянии. Растворенный титан на 75—89% и 10—20% находился в составе анионной и нейтральной фракций РОВ. Образует ли титан комплексные соединения с ГВ и углеводами установить не удалось. Можно предположить его миграцию в виде коллоидных частиц (наночастиц), которые на своей поверхности могут адсорбировать ГВ или углеводы.

Особенности развития фитопланктона исследуемых водохранилищ. В планктоне Денишовского водохранилища найдено 98 видов водорослей, представленных 111 внутривидовыми таксонами (в. в. т.), а в планктоне Отсечного — 60 видов (72 в. в. т.). В целом, по количеству в. в. т. и составу ведущих родов фитопланктон можно характеризовать как зелено-диатомово-эвгленово-синезеленый, однако в Отсечном водохранилище преобладали диатомовые водоросли. Значение родового коэффициента в более зрелом Отсечном водохранилище было ниже (1,3), чем в Денишовском (1,8).

Видовое разнообразие фитопланктона водохранилищ характеризовалось незначительной сезонной изменчивостью. Более выраженной она была в Денишовском водохранилище (рис. 5). В весенний и летний периоды ведущая роль в формировании структуры его фитопланктона принадлежала зеленым (31—33%) и эвгленовым (19—20%) водорослям. Как субдоминанты в весенний период отмечены золотистые (19%) и диатомовые (15%), а в летний — диатомовые и синезеленые (по 18%) водоросли. Осенью наибольшей была доля зеленых и диатомовых (по 30%), в качестве субдоминантов снова появились золотистые водоросли (их доля составила 21%). В Отсечном водо-



5. Сезонная динамика видового разнообразия (а) и флористических спектров (б) фитопланктона Денишовского (I) и Отсечного (II) водохранилищ: 1 — Суанопрокариота, 2 — Euglenophyta, 3 — Chryso-phyta, 4 — Bacillariophyta, 5 — Dinophyta, 6 — Cryptophyta, 7 — Chlorophyta, 8 — Streptophyta.

охранилище во все сезоны флористическую структуру фитопланктона формировали диатомовые (25—31%), зеленые (23—25%), а как субдоминанты отмечены эвгленовые (19—21%) и синезеленые (13—15%) водоросли.

В структуре фитопланктона ведущая роль принадлежала планктонным (42—43%) и планктонно-бентосным (39—46%) видам. По отношению к реофильности преобладали индикаторы стояче-текучих вод (66—70%), также отмечены формы, приуроченные к стоячим (28—31%) и текущим водам (3—5%). По отношению к рН большинство водорослей принадлежало к индифферентам (52—57%), однако достаточно значимой была доля алкалофилов (36—48%), особенно в Отсечном водохранилище.

Большинство видов планктонных водорослей исследованных водохранилищ являются пресноводными формами (доля индифферентов по отношению к галобности составляла 70—73% от количества водорослей, для которых найдены литературные данные). Доля галофилов, мезогалобов, галофобов и олигогалобов была незначительной. Таким образом, воды водохранилищ — слабоминерализованные.

Для оценки степени органического загрязнения водохранилищ была использована система Пантле — Букк в модификации Сладечека [14]. Подавляющее большинство водорослей позволило отнести их воды к III классу качества вод — «вода удовлетворительного качества».

По географическому распространению ядро фитопланктона водохранилищ формировали космополиты (68—86%).

Количественные показатели фитопланктона Денишовского и Отсечного водохранилищ в течение 2012—2013 гг. изменялись в широких пределах.

Средняя биомасса составила соответственно $0,61 \pm 0,13$ и $0,85 \pm 0,63$ г/м³, а численность — $0,13 \pm 0,09$ и $0,48 \pm 0,04$ млн. кл./дм³.

Численность фитопланктона в течение лета — зимы в Денишовском водохранилище определялась синезелеными водорослями (93—99%), а в Отсечном — эвгленовыми (20—28%), диатомовыми (16—34%), зелеными и синезелеными (по 14—17%). Доминирующими видами по численности в Денишовском водохранилище были *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, *Anabaena affinis* Lemmerm., *Oscillatoria planctonica* Wołosz., в Отсечном — *Oscillatoria planctonica*, *O. redekei* Goor, *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *C. stelligera* (Cleve et Grunow) Van Heurck).

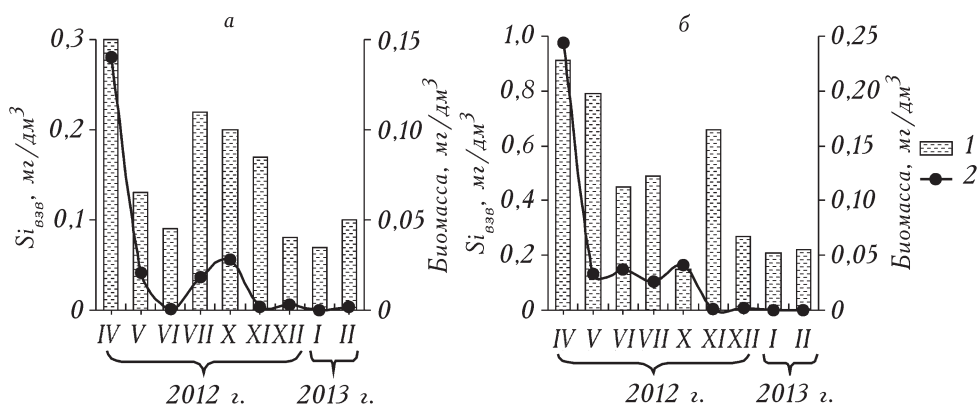
Ведущая роль в формировании биомассы фитопланктона в Денишовском водохранилище принадлежала синезеленым (33—50%), эвгленовым (9—34%) и зеленым (4—32%) водорослям, а в Отсечном водохранилище — эвгленовым (45—79%), диатомовым (7—11%) и зеленым (4—16%). Достаточно заметными в летнем фитопланктоне обоих водохранилищ были динофитовые водоросли, доля которых составляла 22—23%. Возрастание доли эвгленовых водорослей в формировании биомассы фитопланктона Отсечного водохранилища как в пространственном (в сравнении с вышерасположенным Денишовским), так и во временном (в сравнении с данными, полученными в 2004—2005 гг. [20]) аспектах, скорее всего, связана с усилением органического загрязнения вследствие урбанизации прилегающих территорий.

В сезонном аспекте биомассу фитопланктона Денишовского водохранилища весной формировали золотистые (29%), эвгленовые (28%), зеленые (27%) и диатомовые (10%) водоросли, летом — синезеленые (60%), динофитовые (22%) и эвгленовые (13%), осенью — синезеленые (58%), зеленые (22%) и эвгленовые (9%).

Сопоставление значений концентрации $Si_{взв}$ и биомассы диатомовых водорослей в воде Денишовского водохранилища, а также динамики этих показателей в течение года показало, что с возрастанием биомассы диатомей увеличивается содержание кремния в составе взвешенных веществ (рис. 6), значения коэффициентов корреляции для поверхностного и придонного горизонтов составили соответственно 0,73 и 0,63.

Доминирующий комплекс фитопланктона (по биомассе) в Денишовском водохранилище во все сезоны года формировали *Aphanizomenon flos-aquae*, *Oscillatoria planctonica*, *Trachelomonas planktonica* Svirenko, *Cyclotella meneghiniana*, *Chlamydomonas monadina* (Ehr.) F. Stein, в Отсечном — *Oscillatoria planctonica*, *O. redekei*, *Trachelomonas granulata* Svirenko, *Cyclotella stelligera*. Летом в обоих водохранилищах в ранге доминантов отмечали *Peridinium cinctum* (O. F. Müll.) Ehrenb.

Оценка информационного разнообразия фитопланктона была выполнена по индексу Шеннона, рассчитанному по биомассе. Его средние значения в Денишовском водохранилище составляли $2,71 \pm 0,12$, в Отсечном — $2,12 \pm 0,04$ бит/г, что указывает на преобладание в течение вегетационного сезона полидоминантной структуры фитопланктона.



6. Изменение концентрации Si_{vzv} (1) и биомассы диатомовых водорослей (2) в воде поверхностного (а) и придонного (б) горизонтов Денишовского водохранилища.

Заключение

В поверхностных водных объектах абиотические и биотические компоненты тесно взаимосвязаны между собой, что отражается на содержании и формах нахождения химических элементов в воде, а гидрохимический режим влияет на жизнедеятельности гидробионтов. В весенне-летний период фитопланктон влиял на содержание растворенного кислорода и значения pH в поверхностном слое воды. В это время отмечается перенасыщение воды кислородом и смещение pH в щелочную сторону. Для кремния характерна наиболее тесная связь между его содержанием, формами нахождения и сезонными особенностями развития диатомовых водорослей. Установлено, что при возрастании их биомассы концентрация $Si_{раств}$ снижается, одновременно возрастает концентрация Si_{vzv} . Заметным оказалось влияние фитопланктона на содержание и формы нахождения железа. В течение исследуемого периода концентрация лабильного (биодоступного) железа неоднократно снижалась до 0—3,7 мкг/дм³, что свидетельствует о его потреблении гидробионтами, прежде всего планктонными водорослями. Содержание алюминия и меди в потенциально токсичной форме в воде исследуемых водохранилищ не превышало их ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, что свидетельствует о благоприятных условиях для развития водных организмов. Показана важная роль РОВ в миграции алюминия, железа, меди и титана в растворенном состоянии. Возрастание цветности воды и, следовательно, содержания в ней ГВ от весны к зиме свидетельствует об их дополнительном образовании в самих водоемах из отмерших остатков гидробионтов. На это указывает высокое содержание ВВ органической природы. Их относительное содержание в воде Денишовского водохранилища составляет в среднем 76,7%. В составе ВВ преобладает детрит и, возможно, зоопланктон.

В целом, гидрохимические условия в Денишовском и Отсечном водохранилищах благоприятны для развития биоты, в частности вегетации фитопланктона, который является основой автотрофного звена.

**

Представлено результати комплексного дослідження абіотичної та біотичної складової екосистем Денишівського і Відсічного водосховищ, розташованих на р. Тетерів. Основну увагу приділено рН, розчиненому кисню, завислим речовинам і кольоровості води, а також особливостям міграції та розподілу Si, Al, Fe, Ti і Cu. Досліджували структуру (видове і внутрішньовидове різноманіття, чисельність, біомаса) і еколого-географічну характеристику фітопланктону як їхньої первинної ланки. Показано зв'язок між розвитком фітопланктону в цілому і його окремих представників і рН, O₂ і Si. Результати досліджень показують, що у водосховищах р. Тетерів сформовані сприятливі умови для розвитку і життєдіяльності фітопланктону.

**

The results of complex research of abiotic and biotic components of Denyshi and Vid-sichne Reservoirs, located in the Teteriv River are presented. The main attention is given to pH, dissolved oxygen, suspended matter and colour of water, as well as features of migration and distribution of chemical elements Si, Al, Fe, Ti and Cu. Structure (species and intraspecies diversity, number, biomass), ecological and geographic characteristics of phytoplankton as the primary link was investigated. The relationship between development of phytoplankton and of pH, O₂ and Si was shown. The results of research of content and coexisting species of metal show that in reservoirs of Teteriv River environment for the development and vital activity of phytoplankton is favourable.

**

1. Васенко О.Г., Верніченко Г.А. Комплексне планування та управління водними ресурсами. — К., 2001. — 367 с.
2. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Кремний в живой природе. — Новосибирск: Наука, 1984. — 158 с.
3. Глазовская М.А., Добровольская Н.Г. Геохимические функции микроорганизмов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. — 152 с.
4. Жежеря В.А. Модифікований батометр-склянка. — Пат. на корисну модель № 75995 від 25.12.2012.
5. Жежеря В.А., Линник П.М. Співіснуючі форми алюмінію у воді Килійської дельти Дунаю // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. — 2011. — Т. 1 (22). — С. 119—127.
6. Жежеря Т.П., Загорожня А.М., Линник П.Н. Содержание и формы нахождения кремния в воде Каневского водохранилища и их связь с развитием фитопланктона // Гидробиол. журн. — 2014. — Т. 50, № 2. — 106—116.
7. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. — М.: Экология, 1995. — Кн. 4: Главные d-элементы. — 416 с.
8. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. — М.: Мир, 1989. — 439 с.
9. Линник П.М., Дика Т.П. Методичні аспекти дослідження форм знаходження силіцію у природних поверхневих водах // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. — 2012. — Т. 1 (26). — С. 8—18.
10. Линник П.М., Жежеря В.А., Дика Т.П. Спосіб двостадійної обробки завислих речовин і донних відкладів. — Пат. на винахід № 107989 від 10.03.2015.

11. Линник П.Н., Жежеря В.А., Линник Р.П., Иванечко Я.С. Влияние компонентного состава органических веществ на соотношение растворенных форм металлов в поверхностных водах // Гидробиол. журн. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 97—114.
12. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 270 с.
13. Лузовицька Ю.А. Особливості надходження сполук азоту і фосфору з поверхні водозбору // Сучасна гідроекологія: місце наукових досліджень у вирішенні актуальних проблем: Матеріали наук.-практ. конф., Київ, 2—3 квіт. 2015 р. — К., 2015. — С. 43—45.
14. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В. Д. Романенка. — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
15. Набиванець Б.Й., Осадчий В.І., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Аналітична хімія поверхневих вод. — К.: Наук. думка, 2007. — 456 с.
16. Осадча Н.М., Білецька С.В., Саливон-Пескова В.Я., Литвин М.Ю. Особливості надходження гумусових речовин з поверхні водозбору // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. — 2010. — Т. 18. — С. 212—219.
17. Осадчий В.І., Набиванець Б.Й., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Гідрохімічний довідник: Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу. — К.: Ніка-Центр, 2008. — 656 с.
18. Савранский Л.И., Наджафова О.Ю. Спектрофотометрическое исследование комплексообразования Cu, Fe и Al с хромазуролом S в присутствии смеси катионного и неионогенного ПАВ // Журн. аналит. химии. — 1992. — Т. 47, № 9. — С. 1613—1617.
19. Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 168 с.
20. Щербак В.И., Сиренко Л.А., Кузьминчук Ю.С. Особенности развития фитопланктона верхних и нижних бьефов равнинных водохранилищ (на примере р. Тетерев) // Гидробиол. журн. — 2005. — 41, № 6. — С. 44—53.
21. *Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography* / Ed. by P.M. Tsarenko, S.P. Wasser, E. Nevo. — Ruggell: Gantner Verlag, 2006—2011. (Vol. 1. Cyanoprocarvota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta, and Rhodophyta. — 2006. — 713 p.; Vol. 2. Bacillariophyta. — 2009. — 413 p.; Vol. 3 Chlorophyta. — 2011. — 511 p.).
22. Amo Yo.D., Brzezinski M.A. The chemical form of dissolved Si taken up by marine diatoms // J. Phycol. — 1999. — Vol. 35. — P. 1162—1170.
23. Exley C., Wicks A.J., Hubert R.B., Birchall J.D. Polynuclear aluminum and acute toxicity in the fish // J. Theor. Biol. — 1994. — Vol. 167. — P. 415—416.
24. Federici G., Shaw B.J., Handy R.D. Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects // Aquat. Toxicol. — 2007. — Vol. 84. — P. 415—430.

25. *Handy R.D., Owen R., Valsami-Jones E.* The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: current status, knowledge gaps, challenges, and future needs // *Ecotoxicology*. — 2008. — Vol. 17. — P. 315—325.
26. *Linnik P.N.* Complexation as the most important factor in the fate and transport of heavy metals in the Dnieper water bodies // *Anal. Bioanal. Chem.* — 2003. — Vol. 376. — P. 405—412.
27. *Sharma V.K.* Aggregation and toxicity of titanium dioxide nanoparticles in aquatic environment — a review // *J. Environ. Sci. and Health. Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. — 2009. — Vol. 44. — P. 1485—1495.
28. *Xing W., Liu G.* Iron biogeochemistry and its environmental impacts in freshwater lakes // *Fresenius Environ. Bull.* — 2011. — Vol. 20, N 6. — P. 1339—1345.

¹ Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

² Житомирский государственный университет

Поступила 11.01.16