

УДК 556.531(546.28:581.526.325) (285.33)

*Т. П. Жежеря, А. М. Задорожная, П. Н. Линник*

**СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ КРЕМНИЯ  
В ВОДЕ КАНЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ  
СВЯЗЬ С РАЗВИТИЕМ ФИТОПЛАНКТОНА**

Рассмотрены результаты исследований сезонных изменений содержания растворенной и взвешенной форм кремния в воде Каневского водохранилища (верхний участок, зал. Оболонь) и их взаимосвязь с развитием диатомовых водорослей. Концентрация растворенного кремния находилась в пределах 1,0—6,8 мг/дм<sup>3</sup>, а взвешенного — 0,05—0,4 мг/дм<sup>3</sup>. На протяжении периода исследований по видовому и внутривидовому разнообразию диатомовые водоросли составляли в среднем 33% общего количества найденных видов, а по биомассе — 63%. Показано, что одновременно с увеличением их биомассы в мае-июне происходит снижение концентрации растворенного кремния и возрастание содержания его взвешенной формы. Представлены результаты исследований распределения кремния среди абиотической и биотической составляющих взвеси исследуемого водоема. Установлено, что в период вегетации диатомовых водорослей относительное содержание биогенного кремния в составе взвеси увеличивается до 42—45%, тогда как в зимний период наблюдаются минимальные значения — 1—2%.

***Ключевые слова:** кремний, растворенная форма, взвешенная форма, биогенный кремнезем, верхний участок Каневского водохранилища, фитопланктон, Bacillariophyta.*

Среди компонентов химического состава природных вод важное место занимают биогенные элементы, к которым относятся азот, фосфор, кремний и железо [10]. Они входят в число основных факторов, определяющих интенсивность развития водных организмов, трофический статус, а также, в той или иной мере — уровень загрязнения водных объектов.

В функционировании водных экосистем одну из главных ролей выполняет фитопланктон — автотрофная составляющая трофических цепей, основной источник органического вещества и кислорода в водоемах. В то же время, биогенные вещества являются одним из основных показателей, от которых зависит функционирование и структура природных сообществ водорослей [15].

Роль и значение таких биогенных элементов, как фосфор и азот, в жизнедеятельности представителей фитопланктона рассматривались неодно-

© Т. П. Жежеря, А. М. Задорожная, П. Н. Линник, 2014

кратно [1, 4, 6, 7]. В то время как подобных работ, в частности отечественных, где бы столь пристально исследовалась роль кремния в функционировании гидробионтов, крайне мало. Однако не стоит недооценивать роль этого элемента в развитии фитопланктона и его отдельных представителей.

Кремний — химический элемент, который лимитирует рост и развитие диатомовых водорослей и, следовательно, является одним из определяющих факторов первичной продуктивности водоемов и водотоков [20]. В свою очередь, диатомовые водоросли формируют доминирующий комплекс морского и пресноводного фитопланктона, в том числе и в водохранилищах Днепровского каскада в отдельные сезоны года [18, 19]. Bacillariophyta участвуют в образовании 25—40% живого вещества биосферы, а также извлекают из Мирового океана около 3 млрд. т кремния за год [12, 21].

Для диатомовых водорослей кремний является особенно важным и необходимым биоэлементом, поскольку он принимает участие в построении их кремнеземных оболочек-панцирей, которые имеют видо- и родоспецифическую структуру [13]. Кремний также влияет на рост, размер, численность, видовое разнообразие диатомей, принимает участие в синтезе хлорофилла, ДНК и регуляции дыхания. Экспериментальными исследованиями установлено, что при отсутствии кремния приостанавливается деление клеток *Suslotella cryptica*, а также синтез белков, ДНК, хлорофилла и каротиноидов. Снижение содержания кремния в воде до 0,5 мг/дм<sup>3</sup> отрицательно влияет на размножение диатомовых водорослей, а синтез ДНК в его отсутствие происходит только на 4—10% [3, 16, 20, 22].

Целью нашей работы было изучение сезонных изменений содержания и сосуществующих форм кремния, а также особенностей его миграции в связи с развитием фитопланктона в воде верхнего участка Каневского водохранилища.

**Материал и методика исследований.** Исследования проводили в зал. Оболонь, который относится к придаточной сети киевского участка Каневского водохранилища и является глубоководным водоемом карьерного типа.

Пробы воды отбирали на протяжении 2012 —2013 гг. на стационарной станции глубиной  $15 \pm 0,3$  м с пяти (0,25, 2, 8, 12 и 0,25 м от дна) горизонтов батометром Руттнера в полиэтиленовые емкости.

Взвешенные вещества отделяли от растворенных путем мембранной фильтрации свежееотобранных проб воды с использованием мембранных фильтров «Synproг» (Чехия) с диаметром пор 0,4 мкм под давлением  $\approx 2$  атм, которое создавалось с помощью установки УК 40—2М. Содержание взвесей определяли по разности между массой фильтра со взвесью, высушенного при комнатной температуре до постоянной массы, и массой самого фильтра, высушенного до фильтрации. Для предотвращения влияния влажности высушенные фильтры постоянно находились в эксикаторе. Концентрацию кремния в фильтрах воды и в составе взвеси определяли фотометриче-

ским методом в виде синей (восстановленной) формы кремниймолибденовой гетерополикислоты с использованием метол-сульфитной смеси [9].

Содержание кремния в составе взвеси определяли после «мокрого сжигания» фильтра со взвесью в смеси концентрированных серной и азотной кислот квалификации «х.ч.» и последующей гидротермальной обработки остатка неразложившейся взвеси в стальном автоклаве.

Для исследования сосуществующих форм растворенного кремния использовали ионообменную и гель-хроматографию, первая из которых позволяет разделить соединения кремния по знаку заряда, а вторая — установить их молекулярную массу.

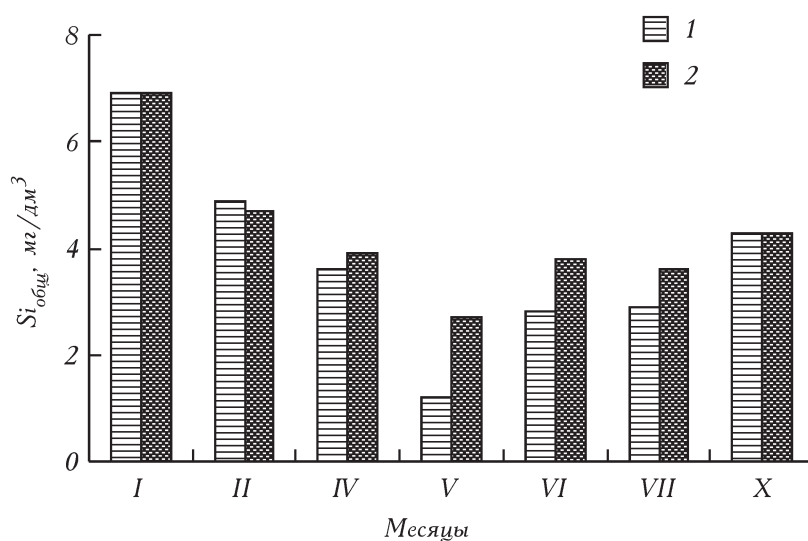
Пробы фитопланктона отбирали в объеме 0,5—1,0 дм<sup>3</sup>. Их фиксацию, седиментацию и камеральную обработку проводили согласно общепринятым гидробиологическим методам [8]. Определение диатомовых водорослей осуществляли на приготовленных препаратах согласно [5]. Подсчет численности производили в камере Нажотта ( $V = 0,05 \text{ см}^3$ ). Биомассу фитопланктона определяли стандартным счетно-объемным методом. Доминирующими считали таксоны, биомасса или численность которых превышала или была равна 10% от суммарных величин. Названия таксонов приведены согласно [11, 17]. В работе обсуждаются только значимые ( $p < 0,05$ ) корреляции. Статистический анализ данных и построение диаграмм проводили с использованием программ MS Excel и Statistica 6.1.

### *Результаты исследований и их обсуждение*

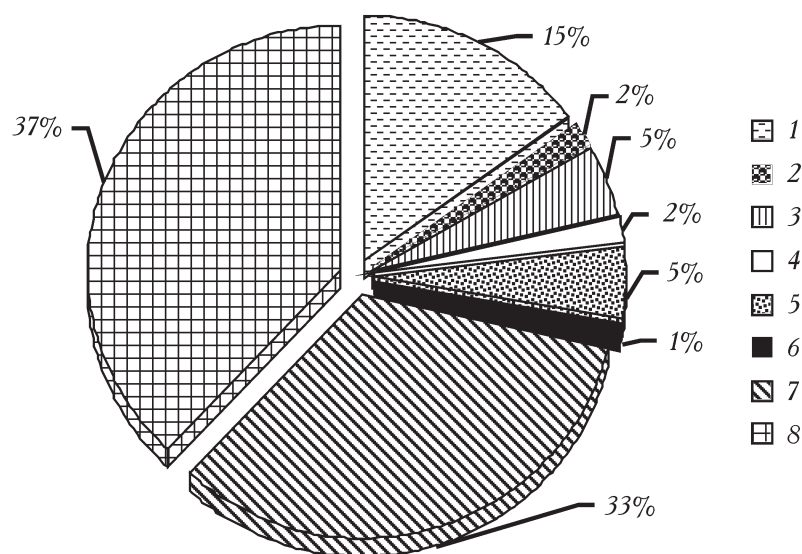
*Соотношение содержания растворенной и взвешенной форм кремния и их сезонные изменения.* Результаты исследований показали, что общее содержание кремния ( $Si_{\text{общ}}$ ) в зал. Оболонь находилось в пределах 1,2—7,0 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 1).

Преобладающей формой миграции кремния оказалась растворенная, на долю которой приходилось от 84,2 до 99,1% его общего содержания. Как показали результаты гель-хроматографических исследований, растворенная форма кремния ( $Si_{\text{раств}}$ ) была представлена главным образом мономерно-димерной формой кремниевой кислоты ( $< 0,2 \text{ кДа}$ ). Она является легко усвояемой и наиболее доступной для гидробионтов, в том числе диатомовых водорослей. Полимерных форм кремния нами не было выявлено.

Особенность кремния как химического компонента поверхностных вод заключается в том, что он является важным и необходимым химическим элементом для некоторых представителей фитопланктона, в частности диатомовых водорослей. В водоемах и водотоках во время образования первичного органического вещества происходит, прежде всего, изъятие кремния из поверхностного горизонта. Затем он накапливается в составе кремнеземных оболочек-панцирей диатомовых водорослей, которые в последующем перемещаются в придонные слои и седиментируют в донные отложения. Это вызывает сезонные колебания не только общего содержания кремния,

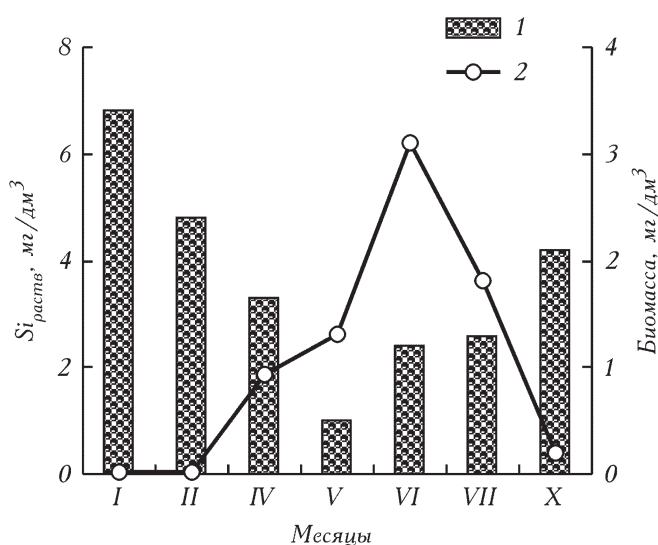


1. Сезонные изменения общего содержания кремния в воде зал. Оболонь. 1 и 2 — соответственно поверхностный и придонный горизонты.



2. Таксономическая структура (%) сообщества фитопланктона зал. Оболонь, 2012—2013 гг.: 1 — Cyanophyta; 2 — Euglenophyta; 3 — Dinophyta; 4 — Cryptophyta; 5 — Chrysophyta; 6 — Xanthophyta; 7 — Bacillariophyta; 8 — Chlorophyta.

но также изменение соотношения его сосуществующих форм — растворенной и взвешенной.



3. Изменения концентрации  $Si_{раств}$  (1) и биомассы диатомовых водорослей (2) в воде поверхностного горизонта зал. Оболонь.

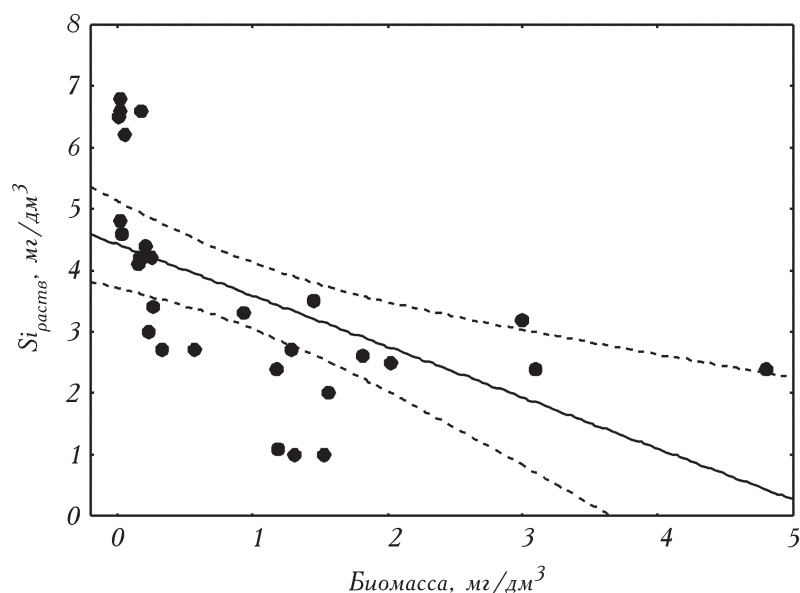
В альгофлоре зал. Оболонь Bacillariophyta занимают второе место (после отдела Chlorophyta — 38%) по видовому и внутривидовому разнообразию, составляя 33% общего количества найденных видов (рис. 2).

Анализ динамики диатомовой флоры показал, что на протяжении года представители Bacillariophyta определяли суммарные величины биомассы (до 63% общей биомассы водорослей) всего фитопланктона и в боль-

шинстве случаев являлись доминантами или субдоминантами в сообществе микроводорослей, в сочетании с другими отделами (зеленые, синезеленые, динофитовые).

В свою очередь, концентрация  $Si_{раств}$  в поверхностном горизонте колебалась от 1,0 до 6,8 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 3,6 мг/дм<sup>3</sup>), а в придонном — от 2,4 до 6,6 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 4,0 мг/дм<sup>3</sup>). Анализ полученных результатов позволяет выделить две особенности распределения в содержании кремния: различие в концентрации растворенного и взвешенного кремния ( $Si_{взв}$ ) в поверхностном и придонном горизонтах, а также в их сезонной динамике.

Что касается содержания  $Si_{раств}$ , то здесь следует отметить весьма заметное его снижение в весенне-летний период. Так, наименьшие концентрации  $Si_{раств}$  в поверхностном (1,0—2,4 мг/дм<sup>3</sup>) и придонном (2,4—3,2 мг/дм<sup>3</sup>) горизонтах исследованного участка водохранилища на протяжении года были отмечены в мае-июне. Это, очевидно, вызвано потреблением кремния диатомовыми водорослями, так как изменения в его содержании тесно связаны с биологическими циклами в жизнедеятельности этих гидробионтов. Таким образом, интенсификация развития диатомовых водорослей приводит к значительному уменьшению концентрации  $Si_{раств}$ , что, в свою очередь, способствует четко выраженным сезонным колебаниям его содержания в водной толще. Возрастание концентрации  $Si_{раств}$  наблюдается уже к концу лета — началу осени, с достижением максимальных значений зимой, как в поверхностном, так и в придонном горизонтах. Именно в зимний сезон происходит заметное снижение интенсивности развития водорослей, в том числе диатомовых, и уменьшение потребления ими кремния. Таким образом,



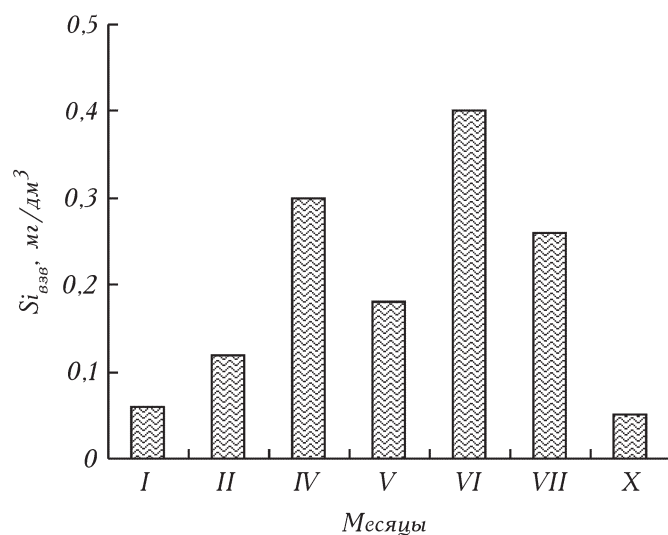
4. Взаимосвязь между содержанием  $Si_{\text{раств}}$  и биомассой диатомовых водорослей в воде зал. Оболонь. Пунктирной линией обозначен 95%-ный доверительный интервал.

одновременно с возрастанием биомассы происходит снижение концентрации  $Si_{\text{раств}}$  в воде и наоборот (рис. 3).

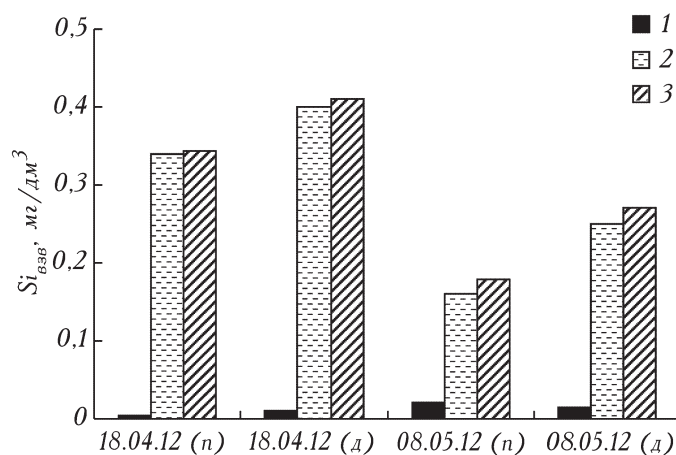
Данная закономерность позволила установить между выше указанными показателями обратную зависимость, характеризующуюся отрицательным коэффициентом корреляции ( $r = -0,57$ ) (рис. 4).

Содержание  $Si_{\text{взв}}$  в воде исследуемого участка водохранилища также имеет сезонную динамику (рис. 5), которая совпадает с сезонными изменениями биомассы фитопланктона (см. рис. 3), что свидетельствует о роли биотической составляющей водных экосистем — диатомовых водорослей — в миграции и преобразовании сосуществующих форм кремния. Подтверждением этого является изменение соотношения между  $Si_{\text{раств}}$  и  $Si_{\text{взв}}$  в течение года. Например, при возрастании как абсолютной, так и относительной концентрации  $Si_{\text{взв}}$  наблюдается почти одновременное снижение содержания  $Si_{\text{раств}}$ . Так, в весенне-летний период в поверхностном горизонте доля  $Si_{\text{взв}}$  возрастает до 9,1—15,3%, а в придонном горизонте — до 10,1—15,8%  $Si_{\text{общ}}$ , тогда как в остальные сезоны относительное его содержание не превышает соответственно 0,9—2,4 и 3,0—4,3%  $Si_{\text{общ}}$ .

*Особенности распределение  $Si_{\text{взв}}$  среди абиотической и биотической составляющих взвеси.* Как известно, в состав взвеси могут входить кремний-содержащие частицы в виде кварца, силикатов и алюмосиликатов, а также взвешенные вещества биогенного происхождения, источником которых яв-



5. Изменения концентрации  $Si_{взв}$  в воде поверхностного горизонта зал. Оболонь.

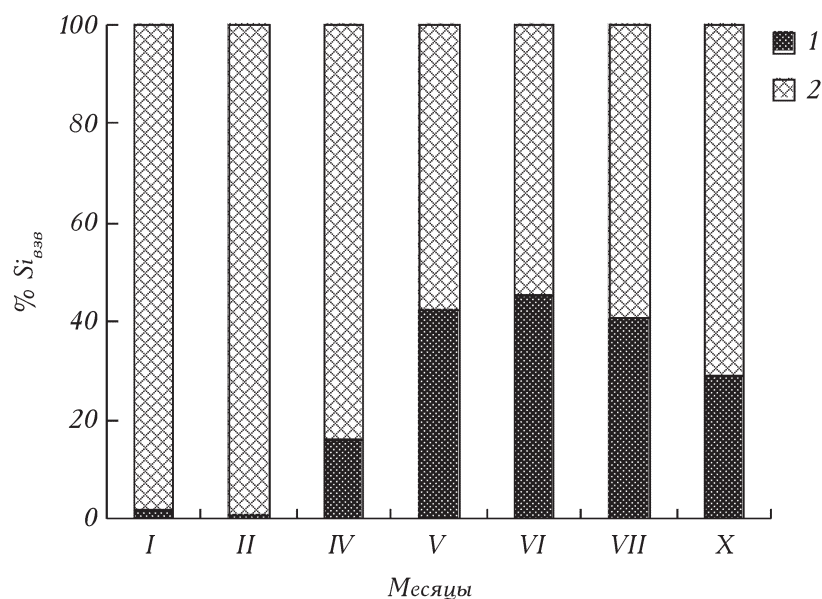


6. Содержание  $Si_{взв}$  в воде зал. Оболонь в зависимости от способа пробоподготовки взвешенных веществ: 1 — после «мокрого сжигания»; 2 — после гидротермальной обработки остатка взвеси; 3 — после использования обоих методов; n, d — поверхностный и придонный горизонты.

ляются организмы-кремнеаккумуляторы, основную массу которых составляют диатомовые водоросли [2]. Поэтому интересно было узнать, каким образом происходит распределение  $Si_{взв}$  между абиотической и биотической составляющими взвеси исследуемого участка Каневского водохранилища.

Результаты проведенных исследований показали (рис. 6), что использование только «мокрого сжигания» для разрушения кремнийсодержащей





7. Относительное содержание биогенного (1) и минерального (2) кремния в составе взвеси воды зал. Оболонь.

взвеси является недостаточным, так как из нее извлекается незначительное количество кремния, входящего, очевидно, в органическую составляющую взвешенных веществ. В ее составе могут быть разные представители фитопланктона — синезеленые, зеленые, диатомовые и другие водоросли. Можно полагать, что «мокрое сжигание» обеспечивает высвобождение кремния из синезеленых и зеленых водорослей и т. п. Однако для разрушения минеральных частиц и кремнеземных панцирей диатомовых водорослей необходимы более жесткие условия, которые достигаются при использовании гидротермальной обработки взвеси. Можно убедиться, что преобладающая часть  $Si_{взв}$  находилась в составе минеральных частиц и панцирей диатомей (см. рис. 6).

На основании полученных данных об общем содержании  $Si_{взв}$  были проведены соответствующие расчеты. Концентрацию кремния, входящего в состав диатомовых водорослей, то есть  $Si_{биог}$ , находили на основании результатов определения их биомассы. При расчетах учитывали влажность биомассы диатомовых водорослей, а также содержание кремнезема в сухом остатке водорослей при их сжигании [3, 14]. Концентрацию кремния в минеральной составляющей взвеси ( $Si_{мин}$ ) рассчитывали по разнице между общим содержанием  $Si_{взв}$  и  $Si_{биог}$ . Результаты такого распределения представлены на рисунке 7.

Как показали результаты исследований, данное соотношение имеет весьма четкую сезонную зависимость — с минимумом содержания  $Si_{биог}$  зи-



мой и максимумом в период вегетации диатомовых водорослей. На протяжении этого периода доля  $Si_{\text{биог}}$  возрастает до 42—45%  $Si_{\text{взв}}$ , что также свидетельствует о важности кремния в жизнедеятельности этих гидробионтов.

### Заключение

Таким образом, кремний как биогенный элемент играет важную роль в развитии и функционировании природных сообществ водорослей, в частности диатомовых. В свою очередь, сезонные изменения содержания кремния зависят от интенсивности развития этих гидробионтов. Подтверждением этому является снижение концентрации растворенного кремния, представленного главным образом мономерно-димерной формой кремниевой кислоты, в весенне-летний период, когда биомасса диатомовых водорослей достигает максимальных значений. Кроме того, Bacillariophyta участвуют в трансформации растворенной формы кремния во взвешенную, что, в свою очередь, влияет на соотношение сосуществующих форм кремния в поверхностных водах. Увеличение относительного содержания биогенного кремния в составе взвеси до 42—45% наблюдается именно в период интенсивной вегетации диатомовых водорослей, тогда как зимой оно не превышает 1—2%.

На протяжении периода исследований диатомовые водоросли составляли в среднем 33% общего количества найденных видов и внутривидовых таксонов, а по биомассе — 63%. Установлено, что между биомассой диатомовых водорослей и концентрацией растворенного кремния существует обратная зависимость со значением коэффициента корреляции  $-0,57$  при уровне значимости  $0,05$ .

\*\*

*Розглянуто результати досліджень сезонних змін вмісту розчинної і завислої форм силіцію у воді Канівського водосховища (верхня ділянка, затока Оболонь) та їхнього взаємозв'язку з розвитком діатомових водоростей. Концентрація розчиненого силіцію знаходилась у межах  $1,0\text{—}6,8\text{ мг/дм}^3$ , а завислого —  $0,05\text{—}0,4\text{ мг/дм}^3$ . Встановлено, що протягом періоду досліджень за видовим і внутрішньовидовим різноманіттям діатомові водорості склали в середньому 33% загальної кількості знайдених видів, а за біомасою — 63%. Показано, що одночасно зі збільшенням їхньої біомаси в травні-червні відбувається зниження концентрації розчиненого силіцію, а також зростання вмісту його завислої форми. Наведено результати досліджень розподілу силіцію між абіотичною та біотичною складовими залежі досліджуваної водойми. Встановлено, що в період вегетації діатомових водоростей частка біогенного силіцію у складі завислої зростає до 42—45%, тоді як взимку спостерігаються її мінімальні значення — 1—2%.*

\*\*

*The results of investigation of seasonal changes in the content of dissolved and suspended forms of silicon in water of Kanev Reservoir (upper part of reservoir, the Obolon' Gulf) as well as their relationship with the vegetation of diatoms were considered. Concentration of the dissolved silicon is  $1,0\text{—}6,8\text{ mg/dm}^3$ , and the suspended one —  $0,05\text{—}0,4\text{ mg/dm}^3$ . It was found that during the research period diatoms concerning the species and intraspecific diversity were on average 33% of the total number of species found, and 63% concerning biomass. It was shown that increasing of diatoms biomass in May and June be accompanied by decreasing of the dissolved silicon concentration, as well as increasing of the suspended*

*silicon concentration. The results of studies on the silicon distribution between abiotic and biotic components of the suspended matter in this reservoir are shown. It was established that during the diatoms vegetation period relative content of biogenic silicon in the suspended matter was increased to 42—45%, while in the winter period its content has minimum values — 1—2%.*

\*\*

1. Васильчук Т.А., Клоченко П.Д. Динамика содержания биогенных и органических веществ в некоторых притоках Днепра и ее связь с развитием фитопланктона // Гидробиол. журн. — 2001. — Т. 37, № 1. — С. 36—47.
2. Витюк Д.М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. — Киев: Наук. думка, 1983. — 208 с.
3. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Кремний в живой природе. — Новосибирск: Наука, 1984. — 158 с.
4. Георгиева В.Ц. Особенности использования соединений фосфора некоторыми видами синезеленых водорослей // Гидробиол. журн. — 1973. — Т. 9, № 2. — С. 109—112.
5. Диатомовый анализ / Под ред. А.Н. Криштофовича. — Л.: Гос. изд-во геол. лит-ры, 1949. — 240 с.
6. Згуровская Л.Н. Содержание хлорофилла и скорость деления клеток у некоторых водорослей в зависимости от обеспеченности питательных сред фосфором // Гидробиол. журн. — 1970. — Т. 6, № 1. — С. 51—56.
7. Курейшевич А.В. Отклик фитопланктона евтрофных водохранилищ на увеличение содержания в воде фосфора и азота // Там же. — 2005. — Т. 41, № 4. — С. 3—24.
8. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В.Д. Романенка. — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
9. Набиванець Б.Й., Осадчий В.І., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Аналітична хімія поверхневих вод. — К.: Наук. думка, 2007. — 456 с.
10. Никаноров А.М. Гидрохимия. — СПб.: Гидрометеоздат, 2001. — 444 с.
11. Разнообразие водорослей Украины // Альгология. — 2000. — Т. 10, № 4. — 309 с.
12. Романенко В.Д. Основы гідроекології: Підручник. — К.: Обереги, 2001. — 728 с.
13. Сорокин В.В., Никитина Э.С., Никитин Д.И. Элементный состав клеток диатомовых водорослей // Микробиология. — 1998. — Т. 67, № 3. — С. 371—375.
14. Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 168 с.
15. Хенджерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Пер. с англ. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 280 с.
16. Ходоровская Н.И., Стурова М.В. Исследование влияния концентраций кремния и фосфора на развитие диатомовой микрофлоры водоема // Изв. Челябин. науч. центра. — 2002. — Вып. 2 (15). — С. 50—53.

17. Царенко П.М., Петлеванный О.А. Дополнение к «Разнообразию водорослей Украины». — Киев: Ин-т ботаники НАН Украины, 2001. — 130 с.
18. Щербак В.І., Майстрова Н.В. Фітопланктон київської ділянки Канівського водоймища та чинники, що його визначають. — К.: Ін-т гідробіології НАН України, 2001. — 70 с.
19. Katsutoshi K., Masakishi N. Silica in the sea its forms and dissolution rate // Deep-Sea Research. — 1975. — Vol. 22. — P. 323—338.
20. Martin-Jezequel V., Hildebrand M., Brzezinski M.A. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth // J. Phycol. — 2000. — Vol. 36. — P. 821—840.
21. Nelson D.M., Treguer P., Brzezinski M.A. *et al.* Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation // Global biogeochemical cycle. — 1995. — Vol. 9, N. 3. — P. 359—372.
22. Round F.E., Crawford R.M., Mann D.G. Diatoms: biology and morphology of the genera. — Cambridge: Cambridge University press, 1990. — 751 p.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 09.01.14