

УДК 574.522

Л. А. Щур

**СОВРЕМЕННЫЙ ФИТОПЛАНКТОН
КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И
КАЧЕСТВО ЕГО ВОДЫ**

За период 2000—2009 гг. в Красноярском водохранилище выделены годы с различным уровнем наполнения водой: маловодные, средневодные и многоводные. По данным мониторинга фитопланктона, наибольшее количество таксонов рангом ниже рода (193) найдено в средневодные годы. Отмечена смена доминантов: синезеленые водоросли сменились диатомовыми, что свидетельствует о снижении трофности водохранилища. По биомассе фитопланктона и индексу сапробности качество воды водохранилища соответствует третьему классу, β-мезосапробной зоне.

Ключевые слова: фитопланктон, численность, биомасса, первичная продукция, индекс сапробности, трофность.

Устойчивость функционирования водных экосистем определяется интегрально опосредованным механизмом взаимодействия отдельных трофических звеньев, каждое из которых по-своему чувствительно к внешним экологическим условиям и характеризуется специфической динамикой количественных и функциональных параметров, в первую очередь это относится к автотрофному звену [4]. В продуктивности водоема важную роль играет его состояние, или так называемое здоровье водоема.

Цель работы — изучить структурные и функциональные характеристики фитопланктона и влияние на них уровня наполнения водоема водой, определить трофность и оценить качество воды Красноярского водохранилища на современном этапе.

Материал и методика исследований. Красноярское водохранилище расположено в среднем течении р. Енисей и относится к крупным глубоководным искусственным водоемам. Его заполнение было осуществлено за четыре года (1967—1970 гг.). Водоохранилище вытянуто в меридиональном направлении (E 91°—92°, N 53°—56°), расположено в зоне резко континентального климата (с холодной зимой продолжительностью более 5 мес и коротким теплым летом). Основные морфометрические характеристики при нормальном подпорном уровне (НПУ) 243 м следующие: площадь водного зеркала — 2000 км², объем водной массы — 73,3 км³, длина — 386 км, средняя ширина — 5,8 км, средняя глубина — 36,7 м, водообмен — 1,4 раза в год. Вода

© Щур Л. А., 2011

водохранилища маломинерализованная, гидрокарбонатного класса, рН 7,4—7,6 [7].

Мониторинг фитопланктона водохранилища проводили в 2000—2009 гг. в течение вегетационного периода (июнь — август). Пробы фитопланктона отбирали в подповерхностном слое батометром Руттнера. Водоросли осаждали на мембранные фильтры Владипор № 9 (диаметр пор 0,90 мкм) и фиксировали адаптированным к длительному хранению раствором Люголя. Концентрат просматривали в камере Нажотта в световом микроскопе «Reval» с использованием фазово-контрастной приставки при общем увеличении $\times 400$, мелкие формы — при $\times 1000$. Биомассу рассчитывали по среднему объему клеток, приравнивая их форму к близкой геометрической фигуре [9]. За единицу учета объема принят «организм», включая одноклеточные, многоклеточные колониальные, ценобиальные и нитевидные водоросли [11].

Степень сложности фитопланктонного сообщества определяли по разнообразию его структуры, выраженному индексом Шеннона по биомассе (H_b). Видовой состав в различные годы исследований сравнивали с использованием коэффициента флористического сходства Серенсена (КФС) [9]. Трофический статус и категории качества воды оценивали по состоянию фитопланктона и индексу сапробности с учетом критериев Пантле и Букк в модификации Сладечека [2, 12]. Проведен эколого-географический анализ водорослей [2].

Индекс j стандартно определяли как среднее количество видов в родах, обитающих в водоеме. Биологический смысл данного индекса отражает «экологическую жесткость» водоема: чем меньше индекс, тем жестче условия существования водоема и более лимитированы ресурсы и наоборот [3].

Валовую первичную продукцию устанавливали методом склянок в кислородной модификации при суточной экспозиции [9]. Расчеты удельной первичной продукции (с перерасчетом на чистую первичную продукцию (P) через коэффициент 0,80 от валовой [13]) проводили на единицу биомассы фитопланктона.

Сравнивали данные, полученные в разные годы при различном уровне наполнения водохранилища (м). Маловодными годами (максимальный уровень воды H_{\max} до 236 м) были 2002, 2003 и 2008-й, средневодными (H_{\max} до 238 м) — 2000, 2005, 2007 и 2009-й и многоводными (H_{\max} до 246 м) — 2001, 2004 и 2006-й.

Результаты исследований и их обсуждение

Фитопланктон водохранилища представлен 286 видами и внутривидовыми таксонами, относящимися к 7 отделам, 10 классам, 21 порядку, 45 семействам и 107 родам. Наиболее богаты видами и внутривидовыми таксонами зеленые (103), диатомовые (77), золотистые (40) и синезеленые (38 таксонов) водоросли. Максимальное количество зеленых водорослей относится к по-

ряду хлорококковых (65), представители которого наиболее разнообразны в евтрофных и гипертрофных водоемах [14].

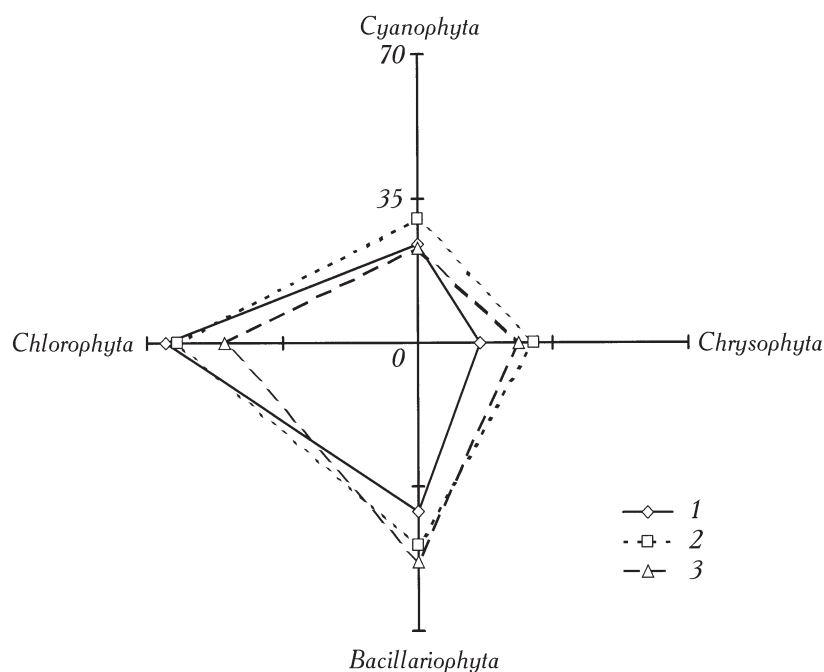
К политипичным относится 18 родов: *Mallomonas*, *Chromulina* (по 12 видов и разновидностей); *Aulacoseira*, *Cymbella* (по 9); *Cryptomonas*, *Synedra* (по 8); *Anabaena*, *Chlamydomonas* (по 7); *Fragilaria*, *Gloeocapsa*, *Oocystis*, *Scenedesmus* (по 6); *Oscillatoria*, *Rhodomonas*, *Gomphonema*, *Nitzschia*, *Monoraphidium* и *Closterium* (по 5 таксонов рангом ниже рода), что составляет 45% общего видового состава. Остальные 89 родов являются маловидовыми. Около половины (48) родов относятся к монотипическим и 21 род — к битипическим.

Из 286 таксонов 183 приурочены к определенным биотопам: 39 (31%) относятся к бентосным организмам, 77 (27%) — к планктонным, 67 (24%) — к планктонно-бентосным. По отношению к солености воды обнаружено 135 индикаторных видов (или 48%), наиболее многочисленными были индифференты — 102 (36% общего числа таксонов); при этом галофилов было 20 (7%), галофобов — 10 (4%), а мезогалобов — 3 (1%). Из общего списка водорослей 29% имели информацию по отношению к pH, из них алкалофилов — 13% (36 таксонов), индифферентов — 12% (или 33 таксона), ацидофилов — 6 таксонов (или 2%) и алкобионтов — 6 (2%). Фитогеографический анализ показал, что преобладали космополитные виды, доля которых составляла 49%, при этом аркто-альпийских и голарктических организмов было по 8% и бореальных — 3%.

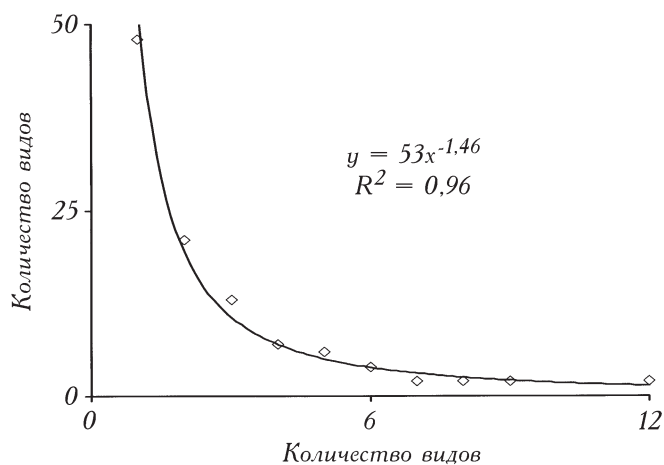
Количество таксонов рангом ниже рода было наибольшим (193) в средневодные годы, в маловодные их было 169, а в многоводные — 164, при недостоверном отличии ($t_{st} = 0,45$ против $t_{табл} = 1,60$). Коэффициент флористического сходства фитопланктона был достаточно высоким: от 0,60 (между многоводными и маловодными) до 0,64 (между средневодными и маловодными годами). Видовой состав водорослей в различные по водности годы претерпевал изменения, при этом преобладали зеленые водоросли (рис. 1). Их доля в общем видовом составе колебалась от 30% (маловодные годы) до 40% (многоводные).

В настоящее время достаточным критерием для анализа состояния водоема считается список видов, полученный при исследовании динамики ценоза в течение многих лет. Водоросли водоема представляют систему, которую можно анализировать с позиций системного анализа, характеризуя видовое разнообразие и его динамику [2, 3]. Характеристика этих параметров в Красноярском водохранилище в 2000—2009 гг. рассмотрена с учетом распределения Виллиса, которое дает информацию о родо-видовых отношениях в экосистеме. Графически это распределение представлено в виде гиперболы с порядком $\alpha = 1,46$ (рис. 2).

Порядок гиперболы изменялся от 1,86 (средневодные) до 1,77 (многоводные) и 1,61 (маловодные годы). Количество родов уменьшалось от 86 (средневодные) до 82 (многоводные) и 79 (маловодные годы). Распределение количества видов по количеству родов для всего периода исследований имеет форму прогнутой кривой без плавного падения, что является одним из показателей антропогенной нагрузки [2].



1. Таксономический состав водорослей Красноярского водохранилища в разные по водности годы: 1 — многоводные, 2 — средневодные, 3 — маловодные.



2. Зависимость Виллиса для водорослей Красноярского водохранилища в 2000—2009 гг.

Кроме распределения Виллиса, информацию о сбалансированности родо-видовых отношений и условиях существования экосистемы определяли с помощью индекса j . В Красноярском водохранилище за период 2000—2009 гг. индекс j был равен 2,42, количество монотипических родов составило 48, наиболее богаты были два рода: *Chromulina* и *Mallomonas*, содержавшие по 12 таксонов. Индекс j в сред-

неводные годы был равен 2,21, в маловодные — 2,14, в многоводные — 1,85. Значения индекса j показывают, что условия существования альгофлоры в

водохранилище за период исследований менее «экологически жесткими» были в средневодные и маловодные годы.

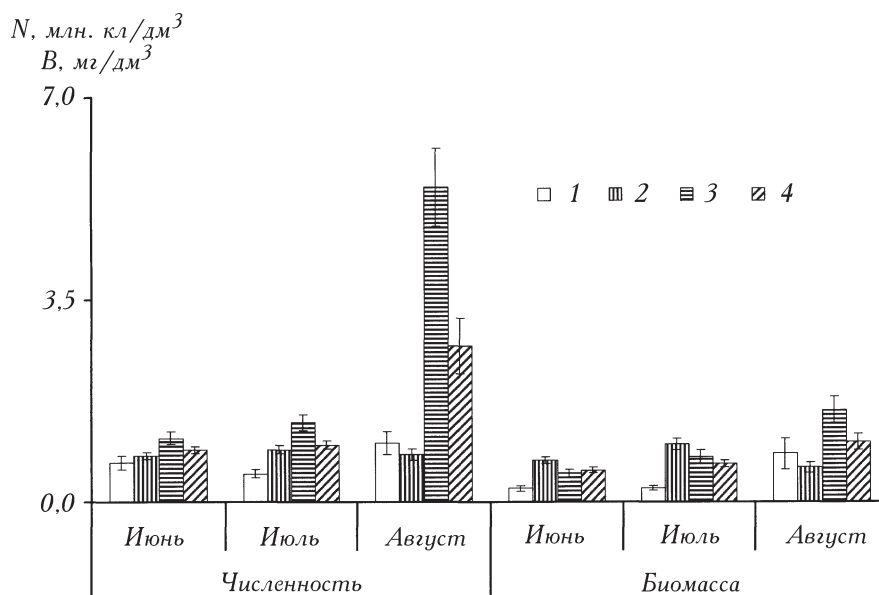
В многоводные годы в июне доминировали *Acanthoceras zachariasii* (Brun) Sim., *Fragilaria crotonensis* Kitt. и *Dinobryon divergens* Imhof.; в июле — виды рода *Cyclotella* и *F. crotonensis*; в августе — *F. crotonensis*. Средневодные и маловодные годы имели схожий состав доминантов: в июне превалировали *F. crotonensis* и *Asterionella formosa* Hass., в июле и августе — виды рода *Cyclotella* и *F. crotonensis*.

Биологический смысл связи между биомассой и индексом разнообразия H_b водорослевого сообщества сводится к следующему. В водоемах в течение некоторого времени наблюдается рост всех популяций, но доминирующими становятся виды с высокой скоростью роста, что проявляется в снижении значений H_b [1]. За годы исследований они варьировали от 0,57 до 3,61, составляя в среднем $1,87 \pm 0,03$. Низкие значения ($H_b = 1,18 \pm 0,02$, в 29% общего количества проб), вне зависимости от месяца исследований, характерны для сообществ с высоким доминированием в биомассе одного-двух видов водорослей. Высокие величины ($H_b = 2,51 \pm 0,03$) отмечены для 39% проб, отобранных в заливах в начале июня, конце июля или августа. Низкие значения H_b указывают на монодоминантную структуру фитопланктона, высокие — на полидоминантную.

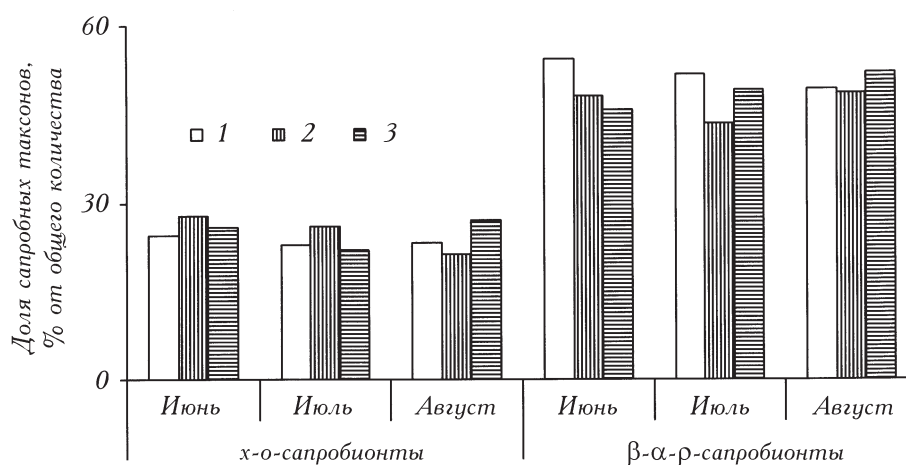
Наибольшие колебания биомассы во все годы исследований отмечены в июне и июле — от 30 до 110 раз, в то время как в августе они составляли 6—12 раз. Биомасса фитопланктона достоверно увеличивалась от июня к августу в многоводные и маловодные годы, так же как и общая за все годы исследований ($t_{st} = 2,90$ — $4,07$ против $t_{табл} = 2,06$). Распределение биомассы в средневодные годы в июне — августе было достаточно равномерным ($t_{st} = 1,80$ против $t_{табл} = 2,04$). В средневодные годы значения биомассы в июне и июле были достоверно выше ($t_{st} = 2,27$ — $10,9$ против $t_{табл} = 1,96$ — $2,11$), чем в маловодные и многоводные. Сравнение биомассы за июнь — август в разные по водности годы показало достоверное ее увеличение в средневодные ($t_{st} = 2,60$, против $t_{табл} = 1,98$) (рис. 3).

Различия в количественном развитии фитопланктона в заливах ($1,07 \pm 0,07$ млн. кл/дм³ и $0,72 \pm 0,05$ мг/дм³) и самом водохранилище ($1,11 \pm 0,09$ млн. кл/дм³ и $0,72 \pm 0,05$ мг/дм³) за весь период исследований и в разные по водности годы были недостоверны ($t_{st} = 0,04$ против $t_{табл} = 1,96$).

Водоросли способствуют самоочищению воды и являются индикаторами органического загрязнения. В водохранилище выявлено 179 таксонов водорослей — индикаторов сапробности, что составляет 63% общего их количества. Доля χ -о-сапробионтов (индекс сапробности соответствует 2-му классу качества воды) не превышала 21—28% общего количества таксонов (соответственно в августе и июне в средневодные годы). На долю β -, α - и ρ -сапробионтов (индекс сапробности соответствует 3-му классу качества воды) приходилось 44—54% (соответственно в июле в средневодные и июне в многоводные годы) (рис. 4).



3. Динамика численности (а) и биомассы (б) фитопланктона в разные по водности годы: 1 — многоводные, 2 — средневодные, 3 — маловодные, 4 — среднее значение.



4. Распределение сапробных организмов в разные по водности годы: 1 — многоводные, 2 — средневодные, 3 — маловодные.

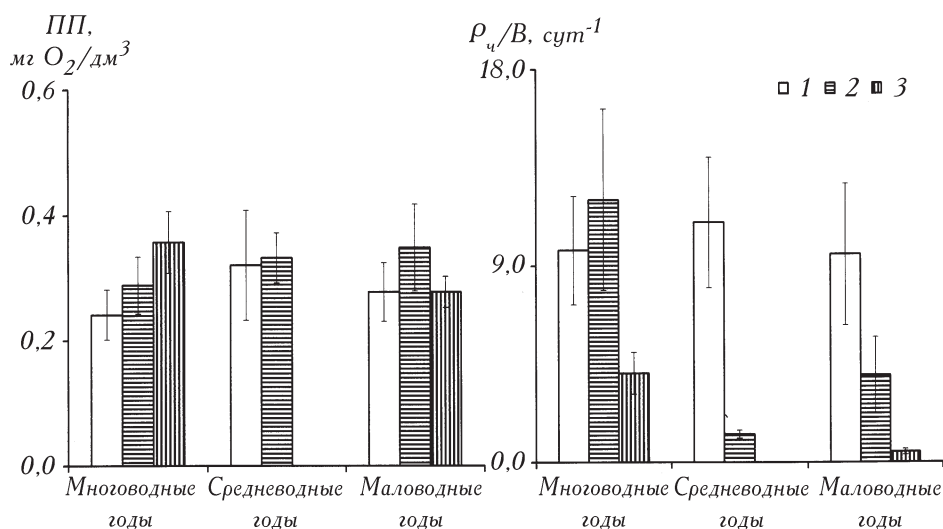
Итоговая оценка качества воды, проведенная [12] по средним значениям биомассы фитопланктона и индекса сапробности, показала, что качество воды оценивается от второго класса, 2а разряда «чистая, очень чистая» до 2б разряда «чистая, вполне чистая» и до третьего класса «удовлетворительно чистая, достаточно чистая». Этому соответствуют β-олигосапробная, α-олигосапробная и β-мезосапробная зоны. Исходя из биомассы фитопланктона

**Биомасса, индекс и зоны сапробности, качество и трофность воды
Красноярского водохранилища в разные по водности годы**

Категории водности и период исследований	Биомасса, мг/дм ²	Индекс сапробности	Классы, разряды качества	Зоны сапробности	Градации, классы трофности (см. в тексте)
Многоводные годы					
Июнь	0,23	2,1	2а	β-о	ОНОМ
Июль	0,23	2,0	2а	β-о	ОНОМ
Август	0,83	1,6	2а	β-о	ОНОМ
Средневодные годы					
Июнь	0,71	1,7	2б	α-о	НМ
Июль	0,99	1,8	2б	α-о	НМ
Август	0,59	1,5	2б	α-о	НМ
Маловодные годы					
Июнь	0,49	1,9	2а	β-о	ОНОМ
Июль	0,77	1,6	2б	α-о	НМ
Август	1,59	1,9	3	β-м	НСМ
Среднее по месяцам					
Июнь	0,54	1,8	3	β-м	НМ
Июль	0,66	1,6	3	β-м	НМ
Август	1,03	1,7	3	β-м	НМ
Среднее за сезон					
Многоводные годы	0,31	2,0	2б	α-о	ОНОМ
Средневодные годы	0,68	1,6	3	β-м	НМ
Маловодные годы	0,74	1,8	3	β-м	НМ
Среднее за все годы исследований	0,73	1,8	3	β-м	НМ

($0,73 \pm 0,04$ мг/дм³) вода Красноярского водохранилища относится ко 2-му классу «очень чистая, вполне чистая», значение индекса сапробности ($1,76 \pm 0,02$) соответствует β-мезосапробной зоне (таблица).

Значительное снижение развития синезеленого планктона и увеличение доли диатомового (до 55—94% общей биомассы), являющиеся показателем снижения трофности, отмечено после 2000 г. вследствие ослабления антропогенного евтрофирования [5, 6, 10, 15].



5. Валовая (а) и удельная первичная (б) продукция фитопланктона в разные по водности годы: 1 — июнь; 2 — июль; 3 — август.

Классы трофности воды Красноярского водохранилища, определенные по биомассе фитопланктона [12], варьировали от очень низкой градации олиго-мезотрофного разряда (ОНОМ), низкой градации мезотрофного класса (НМ) до ниже средней градации мезотрофного класса (НСМ). В течение вегетационного периода (июнь — август) 2000—2009 гг. биомасса фитопланктона ($0,73 \pm 0,04 \text{ мг}/\text{дм}^3$) соответствовала низкой градации мезотрофного класса (см. таблицу).

Средние величины валовой первичной продукции ($0,24 \pm 0,04$ в июне и $0,36 \pm 0,05 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3 \cdot \text{сут}$ в августе в многоводные годы) и удельной первичной продукции ($9,72 \pm 2,49$ и $9,54 \pm 3,25$ в июне и $4,08 \pm 0,96$ и $0,47 \pm 0,13 \text{ сут}^{-1}$ в августе, соответственно в многоводные и маловодные годы) достоверно не различались. В средневодные годы величины удельной первичной продукции в июне и июле различались достоверно (соответственно $11,0 \pm 3,0$ и $1,28 \pm 0,18 \text{ сут}^{-1}$ и $t_{st} = 6,79$ против $t_{\text{табл}} = 2,20$). Средне-летние значения удельной первичной продукции в средневодные годы были достоверно ниже, чем в многоводные и маловодные ($t_{st} = 2,27$ и $3,17$ против $t_{\text{табл}} = 2,08$) (рис. 5).

Заключение

В Красноярском водохранилище в период исследований было найдено 286 таксонов водорослей рангом ниже рода, относящихся к 7 отделам. Наиболее богаты были зеленые водоросли (103). По видовому богатству (193 вида) выделялись средневодные годы. Наблюдаемые с 2000 г. снижение доли синезеленого планктона и увеличение диатомового свидетельствовали об ослаблении эффекта антропогенного евтрофирования и снижении трофности водохранилища. Количественные показатели фитопланктона достоверно увеличивались от июня к августу. В количественных параметрах фитопланктона самого водохранилища и его

заливов достоверного различия не отмечено. Показатели биомассы фитопланктона свидетельствуют о мезотрофном (на грани олиготрофии) состоянии глубоководного Красноярского водохранилища, испытывающего низкую антропогенную нагрузку. Видовое разнообразие фитопланктона (при средних значениях $H_b = 1,87 \pm 0,03$) позволяет предполагать его высокую устойчивость. Валовая первичная продукция не различалась в разные по водности годы. Средние за вегетационный сезон значения удельной продукции в средневодные годы были достоверно меньше, чем в многоводные и маловодные. Качество воды, оцененное по биомассе фитопланктона и индексу сапробности, соответствует 3-му классу, β -мезосапробной зоне; показатель трофности относится к низкой градации мезотрофного класса.

**

Представлено результати багаторічного (2000—2009 рр.) моніторингу фітопланктону Красноярського водосховища. Найбільше видове багатство (193 таксони рангом нижче роду) відмічено в роки із середнім рівнем наповнення. Не виявлено суттєвих відмінностей між характеристиками фітопланктону глибоководної частини водосховища та його заток. Біомаса достовірно зростала від червня до серпня. З 2000 року частка діатомових у фітопланктоні зростає, а синьозелених — зменшилась. Оцінка якості води водосховища за біомасою фітопланктону та індексом сапробності показала, що вона відноситься до третього класу, β -мезосапробної зони. Його трофічний стан відповідає низькій градації мезотрофного класу.

**

The paper presents the results obtained from a long-term monitoring of the Krasnoyarsk water-reservoir over 2000—2009. Maximal taxa number (193) was found in years with moderate water level. Phytoplankton in the deep-water zones of the reservoir and in its bays did not change significantly. The phytoplankton biomass reliably increased from June to August. Since 2000 portion of Bacillariophyta increased whereas portion of Cyanophyta became less. Water quality assessment based on phytoplankton biomass and saprobity index enabled to qualify it as the class 3 and β -mesosaprobic zone. Its trophic index corresponded to the lower gradation of the mesotrophic class.

**

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. — СПб.: Наука, 2001. — 147 с.
2. Барина С.С., Мегвегева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. — Тель-Авив, 2006. — 498 с.
3. Бондаренко Н.А. Экология и таксономическое разнообразие планктонных водорослей в озерах горных областей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. — Борок, 2009. — 46 с.
4. Бульон В.В. Первичная продукция и рыбопродуктивность водоемов: моделирование и прогноз // Биология внутр. вод. — 2006. — № 1. — С. 48—56.
5. Гольц З.Г., Глущенко Л.А., Морозова И.И. и др. Межгодовая динамика биологических показателей в оценке качества воды и структуры экосистемы глубоководного водоема (на примере Красноярского водохранилища) // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная

- трансформация, качество воды: Материалы II Междунар. науч. конф., Минск — Нарочь, 22—26 сент. 2003 г. — Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 2003. — С. 115—117.
6. *Иванова Е.А.* Динамика и функциональная роль фитопланктона в экосистемах водохранилищ бассейна Верхнего Енисея: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. — Красноярск, 2004. — 32 с.
 7. *Красноярское водохранилище: мониторинг, биота, качество воды* / Отв. за выпуск З.Г. Гольд. — Красноярск: Изд-во Сибир. федер. ун-та, 2008. — 538 с.
 8. *Лопатин В.Н., Анонасенко А.Д., Щур Л.А.* Биофизические основы оценки состояния водных экосистем (теория, аппаратура, методы исследования). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 360 с.
 9. *Методика* изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Отв. ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовской — М.: Наука, 1975. — 240 с.
 10. *Минева Н.М., Щур Л.А.* Сравнительная характеристика продукционно-деструкционных процессов в водохранилищах Волги и Енисея // Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия: Материалы Всерос. конф. «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований», Вологда, 24—28 нояб. 2008 г. — Вологда, 2008. — С. 84—87.
 11. *Михеева Т.М.* Степень колониальности и размерно-весовые характеристики фитопланктонных сообществ водных экосистем Беларуси // Гидробиол. журн. — 1998. — Т. 34, № 2. — С. 9—19.
 12. *Оксиук О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Там же. — 1993. — Т. 29, № 4. — С. 62—76.
 13. *Продукционные исследования экосистем пресных вод* / Под ред. Г.Г. Винберга. — Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1973. — 207 с.
 14. *Трифонов И.С.* Экология и сукцессия озерного фитопланктона. — Л.: Наука, 1990. — 180 с.
 15. *Щур Л.А., Сидько Ф.Я.* Динамика первичной продукции Красноярского водохранилища и определяющие ее факторы // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. науки. — 1983. — № 3. — С. 78—82.

Институт вычислительного моделирования
СО РАН, Красноярск

Поступила 17.03.11