

ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ФИТОПЛАНКТОНУ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2014 П.Г. Беляева

Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь

Поступила 11.04.2014

В августе 2013 г. проведены исследования фитопланктона Камского водохранилища в результате которых было установлено, что наибольшим числом таксонов водорослей, рангом ниже рода зарегистрировано в отделе зеленых водорослей. По биомассе преобладают диатомовые водоросли, по численности – синезеленые. По концентрации хлорофилла *a*, численности, биомассе фитопланктона, содержанию общего фосфора и прозрачности воды Камское водохранилище можно отнести к категории мезотрофно-эвтрофных.

Ключевые слова: фитопланктон, трофический статус, фотосинтетические пигменты, водохранилища

Для изучения закономерностей функционирования экосистем водохранилищ и мониторинге водоемов большое внимание уделяется фитопланктону как основному продуценту первичного органического вещества. При исследовании трофического статуса и качества воды водоемов часто используются характеристики фитопланктона: состав, структура, численность, биомасса, содержание Хл *a*, соотношение других пигментов и пигментных индексов, которые косвенно характеризуют продукционно-деструкционные процессы в сообществе планктона [2; 20]. Отнести природные воды к трофическому типу можно и на основе прозрачности воды [7], концентрации биогенных элементов. Предпочтение при этом отдается не потенциальной (содержание биогенов), а реализованной биомассе фитопланктона [17]. Однако, точная оценка трофического уровня конкретного водоема остается весьма серьезной проблемой.

Цель работы – оценить трофность вод Камского водохранилища на основе пигментных характеристик, биомассы, численности фитопланктона, прозрачности воды и содержанию общего фосфора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные характеристики Камского водохранилища и стандартные станции наблюдений приведены ранее [1; 4]. Пробы воды (объемом 1 л) для определения содержания пигментов отбирали в центральном плесе Камского водохранилища в августе 2013 г., одновременно с количественными пробами фитопланктона. Отбор и обработку проб фитопланктона проводили по стандартным методикам [10]. Доминантными считали виды с численностью и/или биомассой более 10%.

Определение содержания хлорофиллов *a*, *b* и *c* (Хл *a*, *b*, *c*), каротиноидов (К) и пигментных индексов ПИ (К/Хл *a*, E_{430}/E_{665} , E_{480}/E_{664}) в планктоне Камского водохранилища проводилось впер-

вые. Содержание пигментов определяли стандартным спектрофотометрическим методом в смешанном 90% ацетоновом экстракте [24]. Концентрации хлорофиллов *a*, *b*, *c* и каротиноидов рассчитывали по соответствующим формулам [22; 23]. Кроме этого, рассчитывали относительное содержание пигментов, а также соотношение каротиноидов и Хл *a* и значения ПИ E_{480}/E_{664} и E_{430}/E_{665} .

Расчет валовой продукция фитопланктона, г C/m^2 за сезон был проведен косвенным методом по формуле:

$$PrimAss = (IF(Lat > 70) THEN (10 * Chl) ELSE (30 * Chl)) * Sec * GS / 1000; \text{ где}$$

Lat – географическая широта; *Chl* – концентрация хлорофилла «а», mg/m^3 ; *Sec* – прозрачность воды по диску Секки, м; *GS* – длительность вегетационного сезона, дни [3].

Содержание общего фосфора ($P_{общ}$) в пробах определяли по стандартным методикам [15]. Прозрачность воды измеряли по диску Секки.

Для оценки трофического статуса водохранилища использовали содержание Хл *a*, общего фосфора, прозрачность воды [21], валовую продукцию фитопланктона за год, г C/m^2 [3], биомассу фитопланктона [7], численность фитопланктона [5].

В статье использованы собственные данные по прозрачности воды, содержанию общего фосфора, численности и биомассы фитопланктона за 2008–2009 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В фитопланктоне Камского водохранилища в августе 2013 г. отмечено 104 таксона водорослей рангом ниже рода. Наибольшим числом видовых и внутривидовых таксонов отличался отдел зеленых водорослей, в котором было сосредоточено 49,5% от общего числа видов, разновидностей и форм водорослей. Наиболее часто встречаются виды родов *Desmodesmus* (R. Chodat), *Monoraphidium* Komárková-Legnerová, *Dictyosphaerium* Näg, *Tetrastrum* Chod, *Pediastrum* Meyen, *Staurastrum* Meyen ex Ralfs. Наибольшего развития (числен-

Беляева Полина Геннадьевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории водной микробиологии, belyaeva@psu.ru

ность 20–40% от общей) они получают в верхнем и центральном районе водохранилища, особенно в мелководных зонах.

Диатомовые водоросли в фитопланктоне (35,6% общего числа видов) представлены как центрическими (виды рода *Aulacoseira*: *A. granulata* (Ehr.) Sim., *A. ambigua* (Grun.) Sim., *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth.) и *Actinocyclus normanii* (W. Greg.) Hust.), так и пеннатыми видами (*Asterionella formosa* Hass., виды рода *Fragilaria*: *F. capuchina* Desm., *F. pinnata* Ehr., *F. crotonensis* Kitt.). Некоторые из этих видов входили в число доминантных, по биомассе (табл. 1).

Таблица 1. Численность (N), биомасса (B) и доминантные виды фитопланктона Камского водохранилища в августе 2013 г.

| Районы водохранилища | B, мг/л | N, млн. кл./л | Доминантные виды |
|----------------------|---------|---------------|---|
| I | 8.3 | 20.6 | <i>Aulacoseira</i> spp. (N, B), <i>Fragilaria pinnata</i> (N, B), <i>F. crotonensis</i> (N, B), <i>Ceratiun hirundinella</i> (B), <i>Actinocyclus normanii</i> (B), <i>Anabaena</i> sp. (N) |
| II | 5.7 | 17.8 | <i>Actinocyclus normanii</i> (B), <i>Aphanocapsa</i> spp. (N), <i>Aulacoseira</i> spp. (N, B), <i>Aphanizomenon flos-aqua</i> (N, B) |
| III | 7.9 | 15.2 | <i>Actinocyclus normanii</i> (N, B), <i>Aulacoseira</i> spp. (N, B), <i>Aphanocapsa</i> spp. (N), <i>Aphanizomenon flos-aqua</i> (N) |
| Среднее для водоема | 7.3 | 17.9 | <i>Actinocyclus normanii</i> , <i>Aulacoseira</i> spp., <i>Aphanocapsa</i> spp. |

Примечание: I – верхний, II – средний, III – приплотинный районы водохранилища

Следует отметить в 2013 г. увеличение доли динофитовых водорослей, особенно *Ceratiun hirundinella* (O.F.M.) Bergh., который на ряде станций верхнего района достигал 20% общей биомассы фитопланктона.

В настоящее время более половины обнаруженных водорослей (64,2%) являются показателями сапробности воды, среди них преобладают индикаторы β -мезосапробной (17,7%) и β -о-мезосапробной (14,4%) степени загрязнения. Индекс сапробности по Пантле-Букку (1,8–2,20) не выходит за пределы β -мезосапробной зоны.

Численность и биомасса фитопланктона в разных районах Камского водохранилища изменялась незначительно (табл. 1). В 2013 г. по численности преобладали синезеленые водоросли (более 50%), а по биомассе – диатомовые (56%). Наибольшие численность и биомасса фитопланктона наблюдались в верхнем районе водохранилища.

Содержание основного фотосинтетического пигмента (Хл *a*) в Камском водохранилище было представлено диапазоном величин, типичных для соответствующего периода сезонного цикла фитопланктона и изменялось от 7,07 до 27,2 мкг/л. Диапазон наиболее часто встречаемых величин составлял 10–15 мкг/л (51% числа наблюдений) (Рисунок). Наибольшее содержание пигмента зарегистрировано в районе сброса теплых вод ГРЭС

Водоросли из отдела *Cyanophyta* (10,5% общего числа видов) на отдельных станциях центрального района водохранилища составляли до 80% общей численности, но в формирование биомассы большого вклада не вносили, до 10%. *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs (до 100 млн. кл./л) и сопутствующие ему виды *Aphanocapsa* Näg. и *Anabaena* Bory S.V. ex Born. Flahault в центральном и приплотинном районах на некоторых станциях вызывали «цветение воды».

Добрянка (до 48,5 мкг/л). В целом, концентрации Хл *a* были близки на различных участках центрального плеса. На правобережных мелководьях они незначительно (в 1,2–1,6 раза, $p \geq 0,05$, $n=32$) превышали таковые в русле. Аналогичные изменения отмечены для Углического водохранилища [8; 9]. Средние, максимальные и наиболее часто встречаемые концентрации Хл *a* планктонных альгоценозов близки к наблюдаемым в водохранилищах Волги [8; 11].

Вклад Хл *a* в фонд зеленых пигментов варьировал от 78% в центральном районе, принимающем основные притоки водохранилища, до 91% в верхнем речном районе, и составлял 85% в приплотинном районе. Среднее содержание дополнительных хлорофиллов в фонде зеленых пигментов колебалось от 0,6 до 9,2% для Хл *b* и от 5,6 до 19,4% для Хл *c* при максимальных величинах в верхнем районе водохранилища. Концентрация суммарного хлорофилла ($a+b+c$) в планктоне варьировала от 8,7 до 30,3 мкг/л, в зоне сброса подогретых вод – 50,3–53,1 мкг/л (табл. 2).

Удельное содержание Хл *a* в сырой биомассе фитопланктона (Хл *a*/B) в августе 2013 г. изменялось от 0,10 до 0,49% и укладывалось в пределы (0,08–9,7) известных значений для других водоемов [18] и водохранилищ Волги [6; 13; 19].

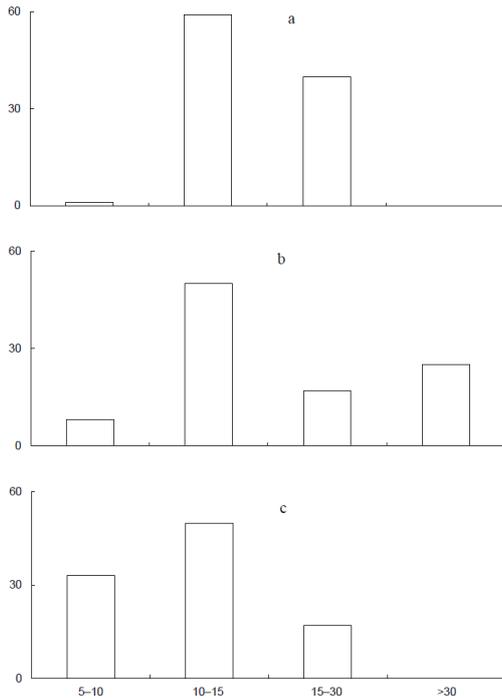


Рис. Частота встречаемости концентраций хлорофилла *a* в верхнем (а), среднем (b) и приплотинном (с) районах Камского водохранилища в 2013 г. (% от общего числа наблюдений).

Полученные соотношения пигментов, а именно превышение значений отношения хлорофилла *c* к хлорофиллу *a* (*c/a*) над величинами соотношения хлорофилла *b* к хлорофиллу *a* (*b/a*) в среднем в 2,5 раза свидетельствует о том, что ведущее по-

ложение здесь занимают диатомовые и динофитовые водоросли [12; 16].

Количественное отношение желтых и зеленых пигментов, выраженное через отношение концентраций каротиноидов и (К/Хл *a*) или ПО E480/E664 отражают физиологическое состояние сообществ. Суммарное содержание каротиноидов в Камском водохранилище уступает Хл *a*, что свидетельствует о физиологическом благополучии фитопланктона. Высокие коэффициенты корреляции между содержанием Хл *a* и К ($r=0,94$, при $p \geq 0,05$; $n=32$) получены для всех участков водохранилища.

По К/Хл *a* воды Камского водохранилища относятся в августе к «хлорофильному» типу (К/Хл $a < 1$), что характерно для эвтрофных вод, а в июне (собственные единичные данные) в верхнем районе ПО E480/E664 превышает единицу (1,0–1,2), характеризуя воды как мезотрофные и относящиеся к каротиноидному (К/Хл $a > 1$) типу. Это соответствует отрицательной в первом случае и положительной, во втором направленности биотического баланса в экосистеме [14].

Пигментный индекс E430/E664 (индекс Маргалефа) физиологического состояния фитопланктона, работающий маркером отношения гетеротрофного метаболизма в сообществе к автотрофному, составил среднем 2–2,5, что свидетельствует о равновесии процессов гетеротрофного и автотрофного метаболизмов фитопланктонного сообщества. Это отношение понижалось до 1,7–1,9 в районе ГРЭС и свидетельствовало о чрезмерном развитии водорослей, процессе «цветения» [14].

Таблица 2. Содержание пигментов и их соотношение в фитопланктоне Камского водохранилища, август 2013 г.

| Районы водохранилища | Chl <i>a</i> | Σ Chl | % Chl <i>a</i> | % Chl <i>b</i> | % Chl <i>c</i> | carotinoids | E430/E665 | E480/E664 | Хл/В |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------|-----------|------|
| Верхний | 11.2–19.8 15.0±2.1 | 13.0–25.2 17.4±3.0 | 79.0–91.3 86.6±2.7 | 1.2–9.2 3.9±2.1 | 7.0–19.4 9.6±2.5 | 8.5–12.9 10.7±1.2 | 2.26±0.01 | 0.85±0.02 | 0.19 |
| Средний | 9.2–27.6 14.7±2.5 | 10.4–30.2 17.1±4.4 | 83.9–91.7 86.7±2.7 | 0.6–16.5 3.8±1.5 | 5.6–15.0 9.9±2.3 | 5.3–13.1 8.1±2.2 | 2.13±0.02 | 0.73±0.02 | 0.25 |
| ГРЭС г. Добрянка | 44.2–48.5 | 50.1–53.4 | 87.8–91.7 | 0.6–3.2 | 5.7–11.7 | 4.6–9.4 | 1.7–1.9 | 0.5–0.9 | – |
| Приплотинный | 7.1–12.3 9.6±1.1 | 8.7–13.5 11.3±1.2 | 80.0–91.3 85.4±2.9 | 1.2–6.7 4.7±1.7 | 7.1–12.9 9.7±1.3 | 4.9–9.2 6.4±0.8 | 2.33±0.02 | 0.77±0.04 | 0.12 |
| Среднее по водохранилищу | 13.3±3.3 | 15.8±4.0 | 84.8±4.7 | 4.9±1.2 | 10.4±3.2 | 8.6±2.1 | 2.3±0.1 | 0.8±0.1 | 0.17 |

Первичная продукция планктона для Камского водохранилища составила 0,05–1,20 г С/м² сут. или 1,40–3,64 г О₂/м² сут. Валовая продукция фитопланктона составила от 80 до 190 г С/м² за сезон, в районе сброса теплых вод эти значения продукции значительно увеличивались (280 г С/м² за сезон).

Величины индекса Карлсона (TSI), рассчитанные по данным о прозрачности воды (TSI_h) и хлорофилла *a* (TSI_{chl}) на всех станциях изменялись незначительно (табл. 3). Несмотря на близкие величины TSI во всех районах водохранилища, они различались на мелководных (57,2–66,7) и русловых (53,8–62,9) станциях, еще более существен-

ное отличие имеют значения, полученные на ст. ниже ГРЭС г. Добрянка (63,2–73,2). В период с 2008 по 2013 гг. величины TSI_h обнаруживают тенденцию к уменьшению.

На основании величин концентрации Хл *a*, биомассы, численности фитопланктона, содержания общего фосфора (табл. 3) были определены частоты встречаемости мезотрофной, мезотрофно-эвтрофной и эвтрофной категорий при оценке Камского водохранилища. По величине численности фитопланктона (4,7–42,0 млн.кл./л) Камское водохранилище относится к мезотрофному типу (67%), по биомассе фитопланктона (2,6–8,9 мг/л) – к мезотрофно-эвтрофному типу (84%). Исходя из средних и наиболее часто встречаемых

величин Хл *a* (10–15 мкг/л) трофический статус Камского водохранилища в большинстве случаев (83%) был ограничен мезотрофно-эвтрофной зоной. По значениям Хл *a*/В воды Камского водохранилища соответствуют мезотрофно-эвтрофным (79%). По величине продукции фитопланктона водохранилище также характеризуется как мезотрофно-эвтрофное. По концентрации общего фосфора – мезотрофно-эвтрофному (57%), эвтрофному (39%) типу. По-видимому, повышенное содержание фосфора и более низкие значения трофности воды по характеристикам фитопланктона свидетельствуют о несоответствии потенциального и реализованного уровня продуктивности в водохранилищах.

Таблица 3. Трофический статус Камского водохранилища по разным показателям (Carlson, 1977; Китаев, 1984; Дмитриев и др., 1997) в период 2008–2013 гг.

| Год | Район | TSI_h | Хл <i>a</i> | TSI_{chl} | $P_{общ.}$ | Н | N | В |
|--------------------|-------|---------|-------------|-------------|------------|-----|------|-----|
| 2008 | I | 62.6 | – | – | – | 2.2 | 4.7 | 2.7 |
| | II | 62.8 | – | – | – | 1.2 | 7.4 | 3.5 |
| | III | 59.8 | – | – | – | 1.0 | 5.1 | 4.1 |
| 2009 | I | 60.6 | – | – | 79.0 | 1.1 | 9.7 | 2.8 |
| | II | 60.8 | – | – | 56.5 | 1.0 | 5.8 | 2.6 |
| | III | 60.8 | – | – | 32.2 | 1.2 | 42.0 | 8.9 |
| 2013 | I | 54.5 | 15.3 | 57.8 | – | 1.6 | 20.6 | 8.3 |
| | II | 54.3 | 14.6 | 57.0 | – | 1.1 | 17.8 | 5.7 |
| | III | 56.0 | 13.2 | 55.6 | – | 1.4 | 15.2 | 7.9 |
| Трофический статус | | М–Э | М–Э | М–Э | М–Э, Э | М–Э | М | М–Э |

Примечание: TSI_h – индекс Карлсона по прозрачности воды, Хл *a* – содержание хлорофилла *a*, мкг/л; TSI_{chl} индекс Карлсона по содержанию Хл *a*; $P_{общ.}$ фосфор общий, мкг/л; Н – прозрачность воды, м; N – численность фитопланктона, млн. кл./л; В – биомасса фитопланктона, мг/л; «–» данные отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фитопланктон Камского водохранилища сформирован в основном зелеными, диатомовыми и синезелеными водорослями. В период исследований наибольший вклад в общую численность фитопланктона вносили мелкоразмерные представители синезеленых водорослей. Биомассу создавали диатомовые водоросли родов *Aulacoseira*, *Fragilaria*, *Actinocyclus* и *Stephanodiscus*. Содержание фотосинтетических пигментов представлено типичным диапазоном величин. Вклад Хл *a* в фонд зеленых пигментов варьировал от 78 до 91%. Соотношения фотосинтетических пигментов свидетельствуют о ведущем положении диатомовых водорослей. Значения пигментных индексов E_{430}/E_{665} и E_{480}/E_{664} указывают на достаточно высокую фотосинтетическую активность фитопланктона. Относительное содержание хлорофилла в сырой биомассе фитопланктона изменялось от 0,1 до 0,5%.

По уровню развития фитопланктона наиболее продуктивен участок среднего района водохранилища, находящийся в зоне теплового загрязнения, под влиянием подогретых вод ГРЭС г. Добрянки.

Трофический статус вод Камского водохранилища по показателям фитопланктона соответствует мезотрофно-эвтрофному типу, по прозрачно-

сти воды и содержанию фосфора изменяется от мезотрофно-эвтрофного до эвтрофного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева П.Г.* К вопросу о распространении *Actinocyclus pomani* (Greg.) Hust. (Bacillariophyta) в Камском и Воткинском водохранилищах // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Том IV. Водная экология. Пермь: Пермский государственный университет, 2011. С. 19–23
2. *Бульон В.В.* Закономерности первичной продукции планктона и их значение для контроля и прогнозирования трофического состояния водных экосистем // Биология внутр. вод. 1997. № 1. С. 13–22.
3. *Бульон В.В.* Первичная продукция и рыбопродуктивность водоемов: моделирование и прогноз // Биология внутр. вод. 2006. № 1. С. 48–56.
4. *Генгал С.И., Беляева П.Г.* Диатомовые водоросли (Cen-*trophyceae*) Камского водохранилища (Россия) // «Альгология», 2011. Т. 21. № 3. С. 312–324.
5. *Дмитриев В.В., Мякишева Н.В., Третьяков В.Ю., Хованов Н.В.* Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем // Вестник СПбГУ. 1997. Сер. 7. Вып. 1. № 7. С. 51–67.
6. *Елизарова В.А.* Содержание фотосинтетических пигментов в единице биомассы фитопланктона Рыбинского водохранилища // Флора, фауна и микроорганизмы Волги. Рыбинск: ИБВВ АН СССР, 1974. С. 44–46.
7. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озера разных природных зон. М.: Наука. 1984. 207 с.

8. *Ляшенко О.А.* Сезонная динамика и многолетние изменения фитопланктона и содержания хлорофилла в Угличском водохранилище // Биология внутр. вод. 2000. № 3. С. 52–61.
9. *Метелева Н.Ю.* Содержание пигментов фитопланктона в Угличском водохранилище // Биология внутр. вод: Информ. бюл. Л. 1990. № 88. С. 8–13.
10. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М. 1975. 239 с.
11. *Минеева Н.М.* Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука. 2004. 156 с.
12. *Минеева Н.М., Шур Л.А.* Содержание хлорофилла а в единице биомассы фитопланктона (обзор) // Альгология. 2012. Т. 22. №. 4. С. 441–456.
13. *Михеева Т.М., Бусько С.А.* К изучению фитопланктона Волги и его продукционных особенностей // Вод. ресурсы. 1975. № 1. С. 101–109.
14. *Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир. 1975. 740 с.
15. *Саралов А.И., Чикин С.М., Банникова О.М., Козлова Г.А., Соломенный А.П.* Распространение фосфатаккумулялирующих бактерий в фосфоритоносных породах поверхностных и подземных водах Западного Приуралья // Микробиология. 1999. Т. 68. № 3. С. 407–417.
16. *Сиделев С.И., Бабаназарова О.В.* Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера // Журн. Сибир. федерал. ун-та. Сер. Биол. 2008. Т. 1. № 2. С. 162–177.
17. *Трифонов И.С.* Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла а в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат. 1993. С. 158–166.
18. *Трифонов И.С., Десортова Б.* Хлорофилл как мера биомассы фитопланктона в водоемах разного типа // Гидробиологические процессы в водоемах. Л.: Наука. 1983. С. 58–80.
19. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука. 1989. 304 с.
20. *Яценко-Степанова Т.Н., Немцева Н.В., Игнатенко М.Е.* Основные подходы к определению трофности природных водоемов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН (электронный журнал). 2014. № 1. С. 1–7.
21. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22. № 2. P. 361–369.
22. *Jeffrey S.W., Humphrey G.F.* New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanz. 1975. Vol. 167. P. 191–194.
23. *Parsons T.R., Strickland J.D.H.* Discussion on spectrophotometric determination of marine plant pigments with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. J. Marine Res. 1963. 3: 155–163.
24. SCOR-UNESCO Working Group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water // Monographs on Oceanographic Methodology. Paris: UNESCO, 1966. P. 9–18.

TROPIC STATUS OF KAMA RESERVOIR ACCORDING TO PHYTOPLANKTON OCCURENCE IN SUMMER PERIOD

© 2014 P.G. Belyaeva

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS

The analysis of Kama reservoir phytoplankton was studied out August 2013, when there was revealed that maximum number of taxa below the genus level were registered in green algae. Diatomic algae were predominant according to biomass, while the abundance was identified among blue-green algae. Considering the chlorophyll a concentration, number, phytoplankton biomass, total phosphorus content and water transparency the Kama reservoir could be attributed to the mesotrophic-eutrophic category.

Key words: phytoplankton, trophic status, photosynthetic pigments, water reservoir