

На правах рукописи

**ГОРБУНОВА  
Юлия Александровна**

**ПРОДУКТИВНОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ**

**03.00.18 – Гидробиология**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук**

**Борок  
2005**

Работа выполнена на кафедре прикладной биологии и микробиологии  
Астраханского государственного технического университета

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор  
**Дзержинская Ирина Станиславовна**

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, главный научный  
сотрудник **Минеева Наталья Михайловна**  
доктор биологических наук,  
профессор **Трифонова Ирина Сергеевна**

Ведущая организация: Зоологический институт РАН

Зашита состоится 14 декабря 2005 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета К.002.036.01 при Институте биологии внут-  
ренних вод им.И.Д.Папанина РАН по адресу: 152742, Ярославская обл.,  
п. Борок,  
тел./факс: (08547)24042

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института биологии  
внутренних вод им.И.Д.Папанина РАН

Автореферат разослан 12 ноября 2005 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат биологических наук

Л.Г.Корнева

2006-4  
22642

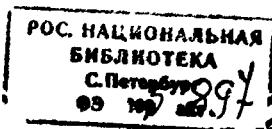
2218240

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одна из главных задач гидробиологии стоит в разработке теории биологической продуктивности водных экосистем (Алимов, 2001). Согласно общепринятым положениям Г. Г. Винберга (1960), первичная продукция водных экосистем наряду с поступающим в них аллохтонным органическим веществом составляет материальную и энергетическую основу всех последующих этапов продукционного процесса. Количественные исследования интенсивности продукционных процессов, в первую очередь первичной продукции, являются основой современной системы типологии водоемов (Бульон, 1983). Определение показателей продуктивности фитопланктона является составной частью мониторинга качества вод (Абакумов, Сущеня, 1992; Оксюк и др., 1993).

Дельта Волги представляет собой уникальный природный объект, выполняющий важнейшую биосферную функцию поддержания гомеостаза водо-болотных угодий региона и имеющий большое хозяйственное значение. За последние почти полвека зарегулированного стока Волги в ее дельте произошли значительные изменения условий среды главным образом из-за колебаний водного стока, его антропогенного внутригодового перераспределения, меняющегося уровня поступления загрязняющих и биогенных веществ и других антропогенных и природных факторов. В связи с этим особую актуальность приобретает формулирование концепции экологической устойчивости и уязвимости водных экосистем региона и оценка их биологической продуктивности. Поэтому изучение продуктивности фитопланктона дельты Волги является в сложившихся условиях особенно актуальным.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы - изучение продуктивности фитопланктона дельты Волги.



*В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:*

1. Исследовать сезонную динамику и пространственное распределение фитопланктона;
2. Изучить сезонную динамику и пространственное распределение растительных пигментов в планктоне;
3. Исследовать сезонную динамику и пространственное распределение интенсивности фотосинтеза;
4. Проанализировать взаимосвязь концентрации хлорофилла *a* с биомассой фитопланктона и интенсивностью фотосинтеза;
5. Выявить основные факторы среды, определяющие продуктивность фитопланктона;
6. Оценить современное состояние первичной продукции планктона в ряду лет зарегулированного водного стока.

**Научная новизна.** Проведена комплексная оценка современного состояния продуктивности фитопланктона и трофического статуса низовьев дельты Волги. Впервые подробно исследовано содержание и динамика растительных пигментов в планктоне, получены значения ассимиляционного числа, как меры фотосинтетической активности хлорофилла *a* в исследованных водных объектах. Выявлены особенности первичного продуцирования планктона нижней зоны дельты и авандельты Волги, рассмотрены процессы выноса и осаждения фитопланктона на предустьевом взморье.

**Практическая значимость.** Дельта Волги и ее предустьевое взморье играют важную роль в поддержании экологического баланса на обширной прилегающей территории суши и акватории Каспийского моря. Полученные результаты могут служить основой для разработки методов рационального использования и охраны биологических ресурсов водных объектов региона, планирования мероприятий по повышению их продуктивности, для построения модели биологического продуцирования при различных вариантах регулирования стока Волги и меняющейся антропогенной составляющей прихода

биогенных веществ. Материалы исследований включены как составная часть в систему мониторинга, проводимого Астраханским биосферным заповедником, а также используются в учебном процессе института биологии и природопользования АГТУ.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были представлены на Научной конференции «Состояние, изучение и сохранение природных комплексов Астраханского биосферного заповедника в условиях повышения уровня Каспийского моря и усиливающейся антропогенной нагрузки» (Астрахань, 1999); Международной конференции «Новые технологии в защите биоразнообразия в водных экосистемах» (Москва, 2002); на Второй международной конференции «Биотехнология – охране окружающей среды» (Москва, 2004); Международной конференции «Проблемы и перспективы реабилитации техногенных экосистем» (Астрахань, 2004); на Международной конференции «Первичная продукция водных экосистем» (Борок, 2004); на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Астраханского государственного технического университета в 1999-2004 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 163 страницах, включает 12 таблиц, 26 рисунков. Состоит из введения, 6 глав и выводов. Список литературы включает 230 наименований, в том числе 70 на иностранных языках.

## **Глава I. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Работа основана на данных полевых наблюдений, выполненных в нижней зоне дельты и авандельте р. Волги на базе Астраханского биосферного заповедника в период с 1994 по 2004 гг.

Определяли концентрацию хлорофиллов *a*, *b* и *c* и каротиноидов в планктоне водотоков и в авандельте во время сезонных съемок (1994-2004 гг.) на 8 основных станциях, отражающих наиболее важные гидрологические типы, во время расширенных съемок отбор проб также осуществлялся на дополн-

нительных станциях, в результате чего было охвачено, в общей сложности, 42 станции и еженедельно на стационаре в протоке (1997-2004 гг.). Содержание растительных пигментов определяли по стандартной спектрофотометрической методике (SCOR-UNESCO, 1966; Lorenzen, Jeffrey, 1980). Расчет концентраций хлорофиллов производили по формулам Джейфри и Хамфри (Jeffrey, Humphrey, 1975), растительных каротиноидов по Парсонсу и Стрикланду (Parsons, Strickland, 1963), пигментного отношения – по отношению оптических плотностей в максимумах поглощения ацетонового экстракта каротиноидами и хлорофиллом  $a$  ( $E_{480}/E_{664}$ ). Всего за период исследований был проведен сбор и обработка 960 проб на определение растительных пигментов планктона.

Отбор проб на определение видового состава и биомассы фитопланктона осуществляли не реже одного раза в месяц на стационаре в протоке и во время сезонных съемок в авандельте на основных станциях в 1997-2000 гг. Отбор и обработку проб фитопланктона осуществляли по общепринятым методикам (Голлербах, Полянский, 1951; Киселев, 1956; Лаврентьева, 1981; Водоросли..., 1989 и др.). Всего было обработано 180 проб на количественный и качественный состав фитопланктона.

Проводили определение первичной продукции планктона ежемесячно в период вегетационного сезона на стационаре в протоке и в авандельте во время сезонных съемок на 4 основных станциях в 1997, 1999, 2000, 2003 и 2004 гг. Использовали метод светлых и темных склянок в кислородной модификации при времени экспозиции 24 ч. (Винберг, 1960). Расчет интегральной первичной продукции под  $1\text{ m}^2$  осуществляли по схеме, разработанной для дельты Волги (Горбунов, 1976). Всего было осуществлено 90 постановок опытов по измерению интенсивности фотосинтеза планктона.

Для моделирования процесса осаждения фитопланктона использовали модифицированный метод определения осаждаемости взвесей (Кульский и др., 1980). Об осаждении фитопланктона судили по изменению концентрации хлорофилла  $a$ .

Содержание в воде биогенных веществ и интенсивность солнечной радиации представлены по данным АЦГМС. Фотосинтетическая активная радиация рассчитана по формуле Н.А. Ефимовой (1977). Для характеристики уровня и температурного режима использованы данные феногидрометеостанции Астраханского биосферного заповедника.

Статистическая обработка материала осуществлялась общепринятыми методами (Урбах, 1964; Лакин, 1980; Гланц, 1999) и при помощи пакетов специализированных программ Mathcad и STATISTICA 6.0.

Для картографического отображения материалов использована ГИС Астраханского биосферного заповедника (ГИС..., 1999).

## **Глава 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Дельта реки Волги является одной из наиболее крупных в мире. Для нее характерна сложная гидрографическая сеть, большое разнообразие животного и растительного мира. В зависимости от особенностей геолого-геоморфологического строения, во многом определяющих экологические условия, дельту подразделяют на верхнюю, среднюю и нижнюю зоны. Выделяют также низовья дельты, охватывающие нижнюю зону надводной дельты и авандельту – предуставье взморье (Белевич, 1963).

Важнейшим фактором, определяющим основные параметры функционирования водоемов дельты, является водный сток Волги. За период инструментальных наблюдений в многолетних колебаниях стока Волги с учетом антропогенного влияния выделяют несколько периодов. Период собственно естественного (ненарушенного) режима стока – с 1881 г. по 1940 г. Период слабонарушенного стока – 1941-1955 гг. С 1955 г. по 1960 г. – период заполнения крупных водохранилищ Волжско-Камского каскада. Начиная с 1961 г. режим стока Волги характеризуется как зарегулированный. (Байдин, 1962; Вуглинский, 1991, Устьевая..., 1998). В течение этого периода формирование современного гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режима дельтовой области Волги проходило несколько этапов. По водности сто-

ка В.Ф. Полонским и О.В. Горелиц (Устьевая..., 1998) было выделено три характерные фазы: 1) 1961-1970 гг. – фаза средней водности; 2) 1971-1977 гг. – маловодная фаза; 3) 1978-1993 гг. – многоводная фаза. Современный период 1994-2004 гг. приближается в целом к многоводной фазе.

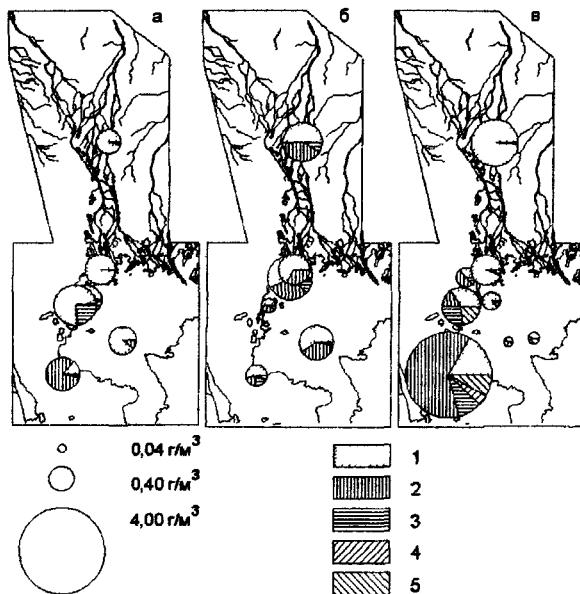
Гидрохимический режим водоемов и водотоков низовьев дельты Волги и, в частности, объем стока биогенных элементов, определяется условиями водосборного бассейна, величиной водного стока, гидрологическим режимом, метеорологическими условиями. Существенную роль играют местные факторы – поступление из мелких водоемов вод, обогащенных органическим веществом, которое в условиях высоких температур подвергается интенсивной деструкции с выделением растворенных соединений фосфора и азота (Горбунов, 1976; Волга..., 1978; Устьевая..., 1996). Большое влияние на содержание биогенных веществ оказывает антропогенная составляющая, в значительной степени за счет поступления биогенов с сельскохозяйственных полей. Количество вносимых удобрений на сельскохозяйственные угодья России сильно менялось во второй половине XX - начале XXI веков. Так, в 70-е и 80-е годы проводившаяся интенсификация сельского хозяйства, сопровождалась постоянным увеличением количества вносимых в почву удобрений. В дельте Волги содержание биогенных веществ (азота и фосфора) достигло максимума в 80-е гг. В 90-е годы, в связи со сложившимся экономическим положением в сельскохозяйственной отрасли страны, произошло резкое сокращение применения удобрений, что в большой степени обусловило уменьшение их поступления в водные объекты (Мартынов и др., 1998).

### **Глава 3. ФИТОПЛАНКТОН, ЕГО СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

В протоках надводной дельты практически на протяжении всего года доминируют диатомовые водоросли. При этом ключевую роль играют представители родов *Aulacosira*, *Melosira* и *Stephanodiscus*. Из зеленых водорослей в значительном количестве встречаются *Pandorina*, *Eudorina*, *Pediastrum*,

развитие которых приурочено к концу весны - началу лета. Период вегетации синезеленых водорослей, в первую очередь *Aphanizomenon* и *Microcystis*, приходится на вторую половину лета. В отдельные годы количественное развитие водорослей этого отдела бывает значительным. Увеличение биомассы фитопланктона в протоках до  $0.5 - 1.0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ , в отдельные годы до  $16.5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ , наблюдается в период весенне-летнего половодья и в летне-осеннюю межень. В холодное время года и в периоды летних минимумов наблюдаются низкие значения биомассы фитопланктона, не превышающие  $200-300 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , иногда  $30-50 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Распределение фитопланктона в авандельте имеет мозаичный характер и существенно отличается по сезонам (рис. 1). Во многих биотопах



**Рис. 1** Пространственное распределение фитопланктона на ключевом участке в нижней зоне дельты и в авандельте в весенний период до наступления половодья (а) в период весенне-летнего половодья (б) и в период летне-осенней межени (в) (на примере 2000 г.). 1 - Bacillariophyta; 2 - Chlorophyta; 3 - Cyanophyta; 4 - Dinophyta; 5 - Euglenophyta.

доминируют диатомовые водоросли (*Navicula*, *Nitzschia*, *Pleurosygma*, *Scletonema*, *Tabellaria*), также в массе могут развиваться представители отдела зеленых (*Actinastrum*, *Dictyosphaerium*, *Micractinium*, *Pandorina*, *Pediastrum*), на отдельных участках в значительных количествах встречаются синезеленые водоросли (*Merismopedia*, *Oscillatoria*) и эвгленовые (*Euglena*). Наибольшая биомасса фитопланктона в авандельте ( $0.8 - 4.5 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ , иногда до  $27.5 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ ) наблюдается в прибрежье в весенний период до начала половодья, а также на локальных участках в период летне-осенней межени. Низкая биомасса фитопланктона ( $0.1-0.4 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ ) наблюдается на открытых участках авандельты в летне-осеннюю межень.

В результате применения кластерного анализа были выявлены основные тенденции пространственного распределения фитопланктона (рис. 2).

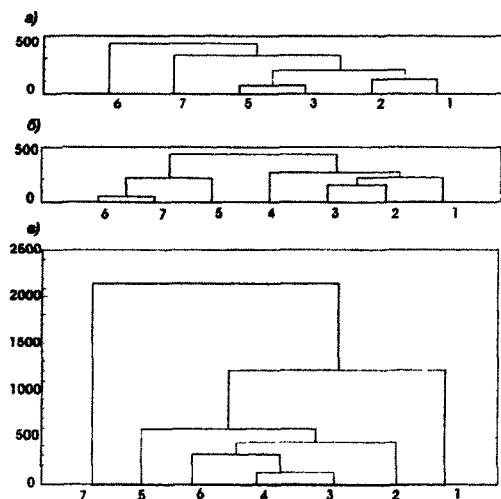


Рис. 2 Результаты кластерного анализа на основе видового состава и биомассы фитопланктона в водотоках нижней зоны дельты и на различных участках авандельты: а. в весенний период до наступления половодья (апрель, 2000 г.); б. в период весенне-летнего половодья (май, 2000 г.); в. в период летне-осенней межени (август, 2000 г.). 1 – протоки; 2 – устьевые участки протоков; 3 – открытые участки авандельты; 4 – пространство между устьями протоков и участками открытой авандельты; 5 – открытая авандельта за зоной островов; 6 – прибрежье островов авандельты; 7 – прибрежные участки островов авандельты с пониженным водообменом.

Представленные иерархические дендрограммы показывают, что в течение вегетационного сезона наблюдается разная степень дифференциации фитопланктона сообществ водотоков и различных участков авандельты. При этом выявленные различия в расстоянии связей на дендрограммах свидетельствуют о наибольшей общности качественной и количественной структуры фитопланктона в период весенне-летнего половодья и ее уменьшении с установлением летне-осенней межени.

Важным фактором является процесс осаждения фитопланктона на предустьевом взморье, что было смоделировано в опыте.

#### Глава 4. СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ ПЛАНКТОНА

В протоках надводной дельты в течение вегетационного сезона содержание хлорофилла *a* (Хл *a*) колебалось в пределах 0.2-61.5 мг·м<sup>-3</sup>, при этом были отмечены в основном два повышения. Первое повышение концентрации Хл *a* наблюдалось в период весенне-летнего половодья и имело обычно четко выраженный одновершинный пик. В летне-осеннюю межень чаще всего наблюдалось второе повышение концентрации Хл *a*, по своему характеру сильно отличающееся в разные годы. Так, в 1997 г. пик Хл *a* имел четкий одновершинный вид (рис. 3). В 1998, 2002 и 2004 гг. динамика Хл *a* носила слаженный характер, в 1999, 2000 и 2001 гг. наблюдался трехвершинный пик. Средневзвешенная за вегетационный сезон концентрация Хл *a* (СВ Хл *a*) была наибольшей в 1997 г. и составляла 9.1 мг·м<sup>-3</sup>. Самые низкие значения отмечены в экстремально маловодном 1996 г. (СВ Хл *a* = 2.7 мг·м<sup>-3</sup>) и в 1994 г. – год с экстремально большим водным стоком (СВ Хл *a* = 4.1 мг·м<sup>-3</sup>).

Содержание хлорофиллов *b* и *c* (Хл *b*; Хл *c*) было невысоким, в среднем их доля, от суммы хлорофиллов, составляла для Хл *b* – 8-12%, для Хл *c* – 15-19%. Концентрация Хл *b* колебалась в пределах 0-6.6 мг·м<sup>-3</sup>, Хл *c* – 0-5.0 мг·м<sup>-3</sup>. Содержание каротиноидов находилось в пределах

$0.3\text{--}35.2 \text{ mSPU}\cdot\text{m}^{-3}$ . Динамика концентрации желтых пигментов была сходна с динамикой Хл *a*, но количественное соотношение в разные годы было различным

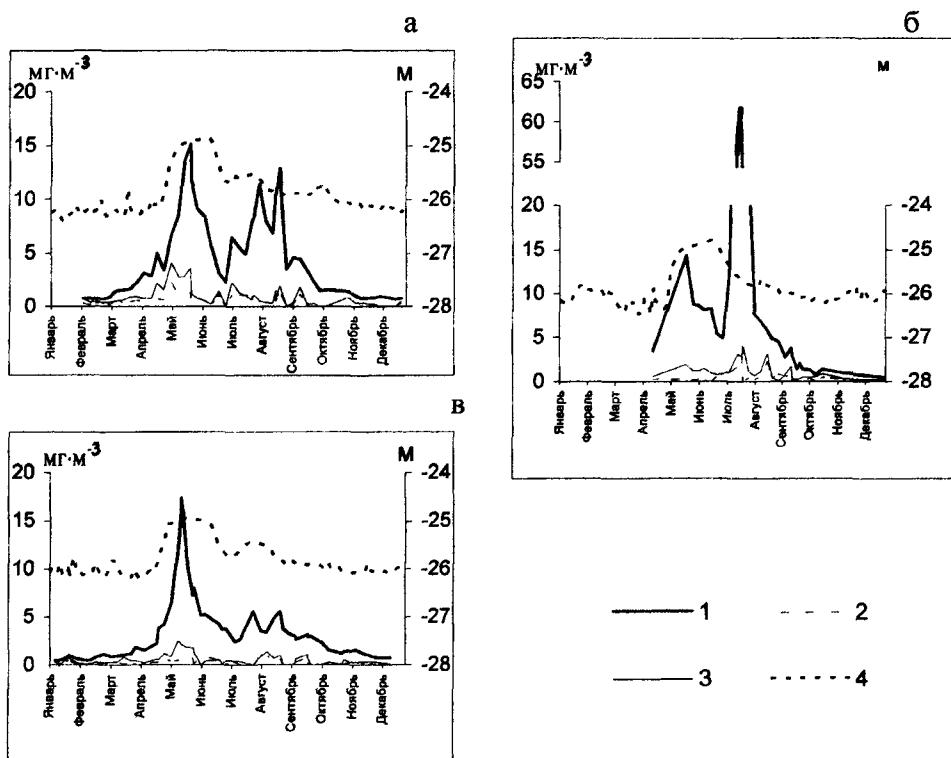


Рис. 3 Динамика содержания хлорофиллов *a*, *b* и *c* в планктоне (первая ось ординат) и уровень воды в протоке (вторая ось ординат) нижней зоны дельты Волги в годы разной продуктивности: а – 2000, б – 1997 и в – 2004.

1 – хлорофилл *a*; 2 – хлорофилл *b*; 3 – хлорофилл *c*; 4 – уровень воды.

Пигментное отношение (ПО) характеризовалось наибольшими значениями в периоды низкого развития фитопланктона – ранней весной, во время раннелетнего минимума, в конце лета, осенью. В зависимости от экологических условий каждого года оно имело свои особенности. Так, в 1997 и 2001 гг.

величины ПО в течение вегетационного сезона были невысокими, в 1994, 1996 и 1999 гг., напротив, были повышенными.

В авандельте распределение фотосинтетических пигментов планктона характеризовалось большой неравномерностью. Содержание Хл *a* в планктоне изменялось от 0.5 до 113.2 мг·м<sup>-3</sup> (рис. 4). Наибольшее содержание Хл *a* наблюдалось весной до начала половодья, особенно в прибрежье островов, когда с увеличением солнечной радиации в условиях мелководья происходит значительное прогревание воды, существенно большее, чем в протоках. С наступлением половодья концентрация Хл *a* в прибрежье островов снижалась, в открытой авандельте изменялась незначительно. В этот период наблюдалось наиболее равномерное пространственное распределение Хл *a* в протоках надводной дельты и в авандельте, в результате того, что высокие уровни воды и большие скорости течения с одной стороны, обеспечивают относительно однотипные условия, с другой – происходит транзитный снос фитопланктона. В период

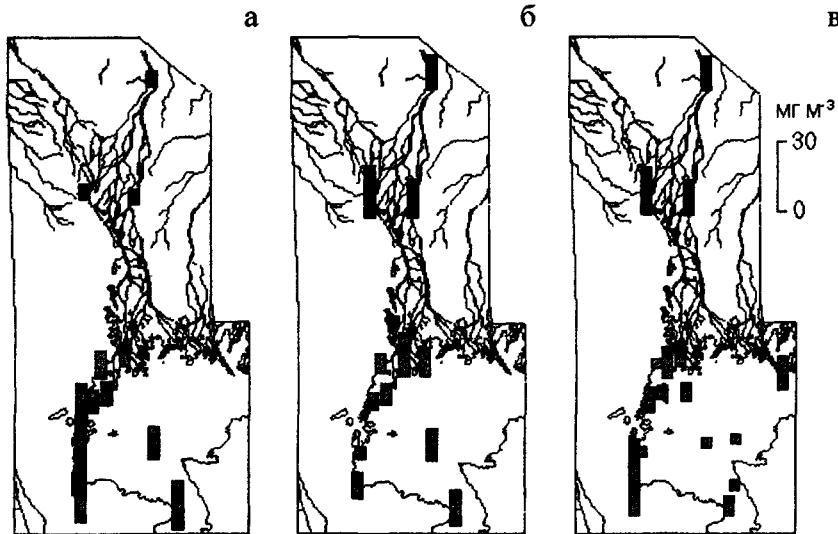


Рис. 4 Пространственное распределение хлорофилла *a* на ключевом участке в нижней зоне дельты и в авандельте (на примере 2000 г.)  
а – в весенний период до наступления половодья; б – в период весенне-летнего половодья; в – в период летне-осенней межени.

летне-осенней межени содержание Хл *a* в авандельте снижалось, за исключением локальных участков прибрежья островов. Содержание Хл *b* в планктоне авандельты изменялось в пределах  $0\text{--}27.8 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , Хл *c* –  $0\text{--}29.4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , каротиноидов –  $0.5\text{--}94.7 \text{ мSPU}\cdot\text{м}^{-3}$ , пигментное отношение менялось от 0.9 до 2.6.

Установлена тесная корреляция между биомассой фитопланктона и содержанием хлорофилла *a* ( $r=+0.60$ ;  $r_{\text{мин}}=0.20$ ;  $P<0.05$ ). При этом было выявлено, что зависимость величины содержания хлорофилла *a* от биомассы фитопланктона имеет криволинейный характер, с увеличением биомассы фитопланктона удельное содержание хлорофилла *a* убывает.

## Глава 5. ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ПЛАНКТОНА

За период исследований интенсивность фотосинтеза в протоках надводной дельты изменялась от 0.1 до  $3.5 \text{ гO}_2\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Значительное увеличение интенсивности фотосинтеза наблюдалось в конце весны, начале лета – в период половодья и в летне-осеннюю межень. В авандельте интенсивность фотосинтеза имела неравномерное пространственное распределение и менялась по сезонам года, наблюдавшиеся значения находились в пределах от 0.2 до  $7.3 \text{ гO}_2\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ .

Интегральная первичная продукция за вегетационный сезон в протоках составляла от 106 до  $199 \text{ гO}_2\cdot\text{м}^{-2}$ . В течение вегетационного сезона продуцирование органического вещества фитопланкtonом происходило неравномерно. Значительная часть первичной продукции планктона, от 24 до 54%, образовывалась в период летней межени – июле и августе. В мае создавалось порядка 22-33% первичной продукции планктона от общего объема за вегетационный сезон, в июне – 10-17%. Во все остальное время первичная продукция составляла менее 30% от общей величины за вегетационный сезон.

Эффективность утилизации энергии солнечной радиации фитопланкtonом в протоках надводной дельты сильно менялась по сезонам года и составляла от 0.03 до 0.08 % от суммарной или 0.04-0.16 % от фотосинтетической активной радиации.

Установлена тесная корреляция между содержанием хлорофилла *a* в планктоне и скоростью фотосинтеза ( $r=+0.89$ ;  $r_{min}=0.24$ ;  $P<0.05$ ), что позволяет осуществлять оценку продуктивности фитопланктона по содержанию хлорофилла *a*, более удобному в определении показателю при проведении обширных пространственных съемок, а также частом отборе проб. Для этого, согласно уравнению регрессии (рис. 5) рассчитано САЧ (суточное ассимиляционное число), которое составило  $118 \text{ mgO}_2 \cdot (\text{mgXl } a \cdot \text{сут})^{-1}$ .

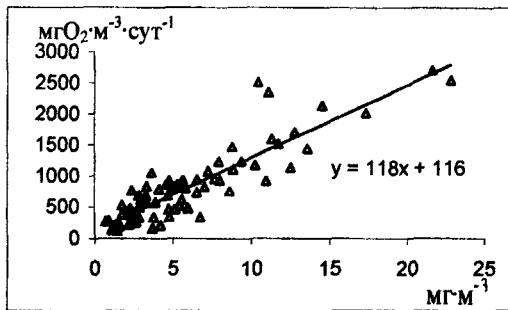


Рис.5 Соотношение между содержанием хлорофилла *a* в планктоне (ось абсцисс) и интенсивностью фотосинтеза планктона (ось ординат).

Проведенное сравнение продуктивности фитопланктона устьев крупных рек показало, что первичная продукция планктона дельты Волги выражается величинами одного порядка с показателями для дельт рек сходной типологии и находится ниже показателей для устьев рек, подверженных сильному антропогенному прессу. Продуктивность фитопланктона устьев рек разной типологии определяется специфической для каждого типа суммой факторов.

## Глава 6. РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА И ИХ СВЯЗЬ С РАЗЛИЧНЫМИ ФАКТОРАМИ

Ретроспективный анализ производительных характеристик фитопланктона в водотоках дельты Волги в условиях зарегулированного стока за вторую

половину XX столетия показал, что с начала 60-х до начала 90-х гг. происходил рост средних величин первичной продукции планктона. В конце 90-х гг. прошлого столетия – начале нынешнего произошло ее снижение по сравнению с предыдущим периодом, и в среднем уровень первичной продукции стал близким к показателям 60-х – 70-х годов (рис. 6). Это свидетельствует о снижении во второй половине 90-х – начале 2000-х гг. уровня эвтрофикации, наметившейся к концу восьмидесятых – началу девяностых годов.

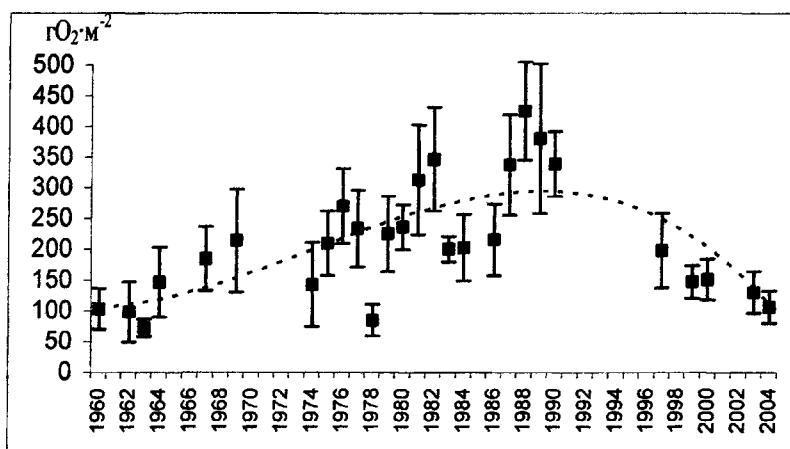
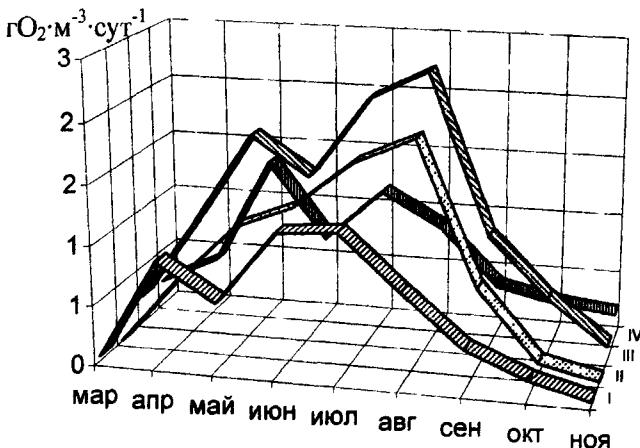


Рис.6 Изменение интегральной первичной продукции планктона за вегетационный сезон в водотоках нижней зоны дельты Волги в ряду лет зарегулированного стока (1960-1990 гг. – данные К.В.Горбунова (1976, 1991); 1997-2004 гг. – наши данные).

В сезонном распределении интенсивности фотосинтеза в рассматриваемые периоды изменения в первую очередь отмечены для летне-осенней межени (рис. 7). В 1997-2004 гг. рассматриваемые показатели приблизились к показателям начального периода зарегулированного стока.



**Рис.7** Сезонная динамика интенсивности фотосинтеза в водотоках нижней зоны дельты Волги в различные периоды зарегулированного стока (1960-1990 гг. – данные К.В.Горбунова (1976, 1991); 1997-2004 гг. – наши данные).  
 I – 1961-1970 гг. – средней водности; II – 1971-1977 гг. – маловодный; III – 1978-1990 гг. – многоводный; IV – 1997-2004 гг. – современный период, в целом характеризующийся высокой водностью стока.

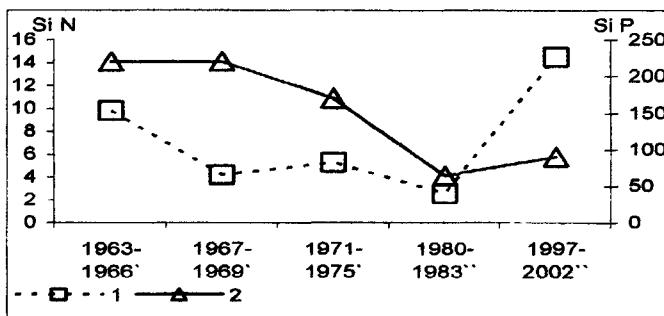
Первичная продукция планктона представляет собой функцию многих переменных факторов, таких как обилие фитопланктона, его качественный состав и физиологическое состояние, которые, в свою очередь, зависят от целого ряда условий внешней среды. Одними из важнейших факторов, определяющими продуктивность фитопланктона, являются световые и температурные условия. В течение вегетационного сезона наблюдалась тесная зависимость между месячными показателями энергии солнечной радиации и интенсивностью фотосинтеза ( $r=+0,83$ ;  $r_{min}=0.51$ ;  $P<0.05$ ) и между месячными показателями энергии солнечной радиации и содержанием хлорофилла *a* ( $r=+0,73$ ;  $r_{min}=0.47$ ;  $P<0.05$ ). При проведении корреляционного анализа между суммой температур воды за месяц и среднемесячной скоростью фотосинтеза, а также суммой температур воды за месяц и среднемесячной концентрацией хлорофилла *a* в планктоне, в обоих случаях был получен разный характер связи для

летне-осеннего фитопланктона и фитопланктона весеннего и позднеосеннего, во всех случаях корреляция была достоверна ( $r > r_{min}$ ).

Одним из важнейших факторов, определяющих как общий уровень продуктивности фитопланктона, так и его сезонную динамику, является наличие в воде биогенных веществ. Содержание легкодоступных для фитопланктона минеральных форм фосфора и азота за период зарегулированного стока Волги значительно менялось. Так, в 1961-1970 гг., содержание этих веществ, в среднем, составляло, соответственно,  $12 \pm 2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  и  $388 \pm 28 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , в 1978-1990 гг. оно увеличилось до  $32 \pm 5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  и  $672 \pm 64 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Средние значения этих показателей за 1997-2004 гг. составляли  $29 \pm 5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  и  $192 \pm 22 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Важным фактором, определяющим продуктивность фитопланктона, являются не только абсолютные концентрации биогенных веществ, но и их соотношение. Средние значения соотношения минеральных форм азота и фосфора за 1961-1970 гг., 1971-1977 гг., 1978-1990 гг. и 1997-2002 гг. составляли соответственно 36, 30, 28 и 7, что в первые три периода было выше, а в последний – ниже нормального стехиометрического соотношения этих веществ в клетках фитопланктона. При статистическом анализе показателей интегральной первичной продукции за вегетационный сезон и среднегодовой концентрации минерального азота за ряд лет регулируемого стока в годы при  $N:P < 10$  получена значимая связь ( $r = +0.93$ ;  $r_{min} = 0.75$ ;  $P < 0.05$ ), также установлена значимая связь между показателями интегральной первичной продукции планктона за вегетационный сезон и среднегодовой концентрацией минерального фосфора за ряд лет регулируемого стока в годы при  $N:P > 15$  ( $r = +0.64$ ;  $r_{min} = 0.58$ ;  $P < 0.05$ ). Таким образом, многолетние изменения первичной продукции планктона в большой степени обусловлены параметрами биогенного питания. Причем на современном этапе наблюдается перестройка соотношения основных биогенных веществ с переходом лимитирующей роли от фосфора к азоту. Причиной этого, очевидно, в значительной степени является уменьшение стока биогенов с сельскохозяйственных угодий, что связано с резким сокращением применения удобрений. Показательным индикатором антропогенного поступления азота и фосфора в водные объекты является предложенное М.П. Максимовой (1979) соотношение между концентрацией минерального

кремния и соединениями азота и фосфора ( $\text{Si:N}$ :  $\text{Si:P}$ ). В связи с тем, что содержание минерального кремния, как правило, не возрастает за счет антропогенных факторов, его концентрация играет роль репера, с которым сравнивают концентрации азота и фосфора. К 1997-2002 гг. произошло резкое увеличение отношения  $\text{Si:N}$ , свидетельствующее о существенном уменьшении антропогенного поступления азота (рис. 8).



**Рис.8** Изменение отношения содержания минерального кремния (Si) к содержанию минеральных форм азота (N) и фосфора (P) в различные периоды зарегулированного стока. (соотношение, рассчитанное М.П. Максимовой (1979); "соотношение, рассчитанное по данным АЦГМС). 1 -  $\text{Si:N}$ ; 2 -  $\text{Si:P}$ .

Известно, что при недостаточной обеспеченности фитопланктона соединениями азота наблюдается повышение показателей пигментного отношения (Watson, Osborn, 1979). В период 1997-2002 гг. наблюдается увеличение пигментного отношения в годы с наименьшим соотношением N:P. В сезонной динамике пигментного отношения обычно наблюдается повышение в период деградации фитопланктона после весенне-летнего максимума. Последующее понижение пигментного отношения обычно происходит через 1-3 недели после начала спада половодья, когда происходит отток вод из полойных систем, обогащенных соединениями азота.

Одной из важных и показательных величин для характеристики продуктивности фитопланктона является средняя величина содержания хлорофилла *a* за вегетационный сезон. За период наблюдений средняя величина содержания хлорофилла *a* за вегетационный сезон изменялась в пределах

2.7-9.1 мг·м<sup>-3</sup> (рис.9) и в большой степени была сопряжена с водностью стока (табл.1).

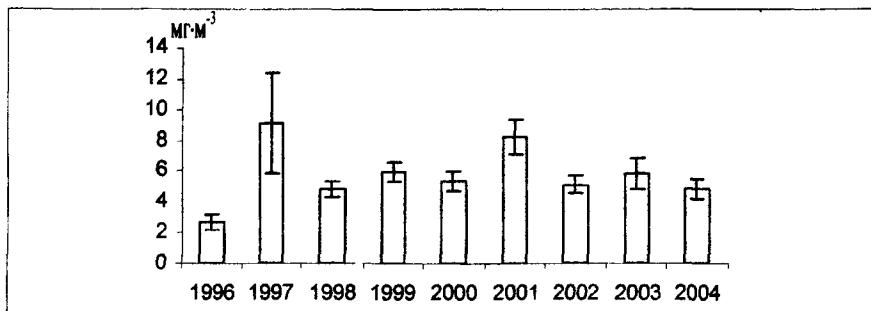


Рис.9 Средневзвешенная за вегетационный сезон концентрация хлорофилла *a* в планктоне протока нижней зоны дельты Волги в 1996-2004 гг.

Таблица 1.  
Основные гидрологические параметры водного стока в 1996 – 2004 гг.  
(гидрологический бюллетень по Волгоградскому водохранилишу)

Параметры	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Средне-многолет
Объем стока годовой, км <sup>3</sup>	177	243	287	289	253	282	265	252	270	248
Объем стока в период половодья, км <sup>3</sup>	75	133	140	145	129	152	142	122	91	125
Длительность половодья, дни	50	92	77	87	66	94	103	68	77	74

Высокие показатели продуктивности фитопланктона приурочены главным образом к средним по водности и умеренно многоводным годам. Важным является характер внутригодового распределения водного стока. Также на продуктивность фитопланктона влияют не только параметры стока текущего года, но и предшествующих лет.

## ВЫВОДЫ

1. В составе фитопланктона водотоков нижней зоны дельты Волги в течение всего года доминирующее положение занимают диатомовые водоросли: в холодное время года – пеннатные, с апреля-мая и до октября-ноября – центрические. В весенне-летний период значительного развития достигают зеленые, во второй половине лета – синезеленые водоросли. В авандельте распределение фитопланктона носит мозаичный характер, наряду с диатомовыми водорослями на отдельных участках ведущее положение занимают синезеленые, зеленые и эвгленовые.

2. Содержание хлорофилла *a*, в водотоках нижней зоны дельты и в авандельте, изменяется в пределах 0.2-113.2  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , хлорофилла *b* – 0-27.8  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , хлорофилла *c* – 0-29.4  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , каротиноидов – 0.3-94.7  $\text{мSPU}\cdot\text{м}^{-3}$ , пигментное отношение меняется от 0.1 до 3.8. Сезонная динамика хлорофилла *a* в водотоках характеризуется повышением его концентрации в период весенне-летнего половодья и летне-осенней межени, в авандельте – в весенний период до начала половодья и на локальных участках прибрежья островов в летне-осеннюю межень. В пространственном распределении хлорофилла *a* наблюдаются наиболее равномерная картина в период весенне-летнего половодья, наибольшая дифференциация – в период летне-осенней межени. Пространственное распределение хлорофилла *a* в целом соответствует распределению биомассы фитопланктона.

3. Интенсивность фотосинтеза фитопланктона в водотоках нижней зоны дельты изменяется в пределах 0.1-3.5  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  и авандельты – 0.2-7.3  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ , сезонная динамика и пространственное распределение фотосинтеза меняется в течение вегетационного сезона и в целом соответствует динамике содержания хлорофилла *a*.

4. Установлена тесная положительная линейная зависимость между содержанием хлорофилла *a* в планктоне и скоростью фотосинтеза ( $r=0.89$ ,  $P<0.05$ ), и положительная криволинейная зависимость между содержа-

нием хлорофилла *a* и биомассой фитопланктона ( $r=0.60$ ,  $P<0.05$ ). Рассчитанное по уравнению регрессии САЧ составило  $118 \text{ мгO}_2\cdot(\text{мгХл } a\cdot\text{сут})^{-1}$ .

5. Установлена значимая связь показателей продуктивности фитопланктона и содержания хлорофилла *a* с температурой воды, содержанием минеральных форм азота и фосфора, в большой степени зависящими от объема водного стока и особенностей его внутригодового распределения. Средние за вегетационный сезон величины первичной продукции зависят от гидрологических условий года. Более высокая первичная продукция получена в средние по водности и умеренно многоводные годы, а более низкая - в маловодные и экстремально высокие по водному стоку годы. На среднюю за сезон величину первичной продукции влияют параметры стока текущего года, а также предыдущих лет. Многолетние изменения первичной продукции определяются общим поступлением биогенных веществ, включая антропогенную составляющую.

6. Ретроспективный анализ первичной продукции планктона в водотоках дельты Волги показал, что с начала 60-х до начала 90-х гг. XX-го столетия наблюдался рост ее средних величин, в 1997 – 2004 гг. произошло снижение до показателей 60-х – 70-х годов, что свидетельствует о снижении уровня эвтрофикации, наметившейся к концу восьмидесятых – началу девяностых годов. Современный трофический статус водотоков нижней зоны дельты Волги оценивается как мезотрофный.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- Горбунова А. В., Горбунова Ю. А. Распределение и динамика содержания хлорофилла «*a*» в планктоне водоемов Астраханского биосферного заповедника // Состояние, изучение и сохранение природных комплексов Астраханского биосферного заповедника в условиях повышения уровня Каспийского моря и усиливающейся антропогенной нагрузки. – Тез. докл. науч. конф. Астрахань: ООО «ЦНТЭП», 1999. – с. 19 – 21.

2. Горбунов А. К., Горбунова А. В., Косова А. А., Горбунова Ю. А. Распределение планктона в низовьях дельты Волги // ГИС Астраханского заповедника. Геохимия ландшафтов дельты Волги. Геоэкология Прикаспия. Вып. 3. – М.: МГУ, 1999. – с. 78 – 82.
3. Горбунова Ю. А. Оценка состояния первичной продуктивности водоемов низовьев дельты Волги // Тез. междунар. научн. конф. посвящ. 70-летию АГТУ. – Астрахань, 2000. – с.136-137
4. Горбунова Ю. А., Горбунова А. В. Сезонная динамика и распределение пигментов фитопланктона в водоемах низовьев дельты Волги // Новые технологии в защите биоразнообразия в водных экосистемах. Тез. докл. междунар. научн. конф. – Москва: МГУ, 2002. с. 214
5. Gorbunova J.A., Gorbunova A.V. Suspended sediments and chlorophyll dynamics and distribution in the water bodies of the Volga Delta // Ninth International Symposium on the interactions between sediments and Water. – Canada, 2002. – p.20.
6. Горбунова Ю. А. Количественная и структурная характеристика фитопланктона низовьев дельты Волги // Биотехнология – охране окружающей среды. Тез. докл. междунар. научн. конф.– Москва: МГУ, 2004. – с. 23.
7. Горбунова Ю.А. Пространственное и сезонное распределение фитопланктона в водоемах низовьев дельты Волги // Проблемы и перспективы реабилитации техногенных экосистем. Матер. междунар. научно-практич. конф.- Астрахань, 2004. – с. 223 – 227.
8. Горбунова Ю.А. Первая продукция водоемов низовьев дельты Волги // Первая продукция водных экосистем. Матер. междунар. научн. конф., Борок, 2004. – Ярославль, 2004. – с. 19 - 20.



№ 22405

РНБ Русский фонд

2006-4  
22642

Типография Астраханского государственного технического университета

414025 г.Астрахань, ул.Татищева, 16

Заказ № 677. Тираж 100 экз.

Подписано в печать 09.11.2005 г.