

*С. В. Александров, Ю. А. Горбунова*

**ПРОДУКЦИЯ ФИТОПЛАНКТОНА  
И СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА  
В ЭСТУАРИЯХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

*Обсуждаются результаты многолетних исследований продукции фитопланктона и содержания хлорофилла в разнотипных эстуариях – Калининградском (Вислинском) и Куришском заливах, дельте Волги. На основе сопоставления с гидрологическими и химическими показателями выделены главные факторы, обуславливающие первичную продукцию и уровень эвтрофирования. В дельте Волги продуктивность экосистемы прежде всего определяется речным стоком, тогда как в Калининградском и Куришском заливах – интенсивностью водообмена с морем. В современный период в дельте Волги наблюдается деэвтрофирование, тогда как в Калининградском и Куришском заливах продолжается эвтрофирование экосистем.*

*This article focuses on the results of many years' research on phytoplankton production and chlorophyll concentration in estuaries of different types (the Vistula and Curonian Lagoons, and the Volga delta). A comparison with hydrological and chemical parameters helped identify the main factors determining the level of primary production and eutrophication. The productivity of an ecosystem is determined primarily by river runoff in the Volga delta, while in the Vistula Lagoon and Curonian Lagoon by the intensity of water exchange with the sea. Today, deeutrophication is being observed in the delta of Volga, whereas eutrophication continues in the Vistula and Curonian Lagoons.*



**Ключевые слова:** эстуарии, первичная продукция, эвтрофирование, Куршский и Калининградский (Вислинский) заливы, дельта Волги.

**Key words:** estuaries, primary production, eutrophication, Curonian and Vistula Lagoons, Volga delta.

## Введение

Эстуарии — полузамкнутые прибрежные системы, имеющие разную степень связи с морем, к ним относятся дельты рек, заливы, лагуны, лиманы. Они характеризуются сложной, уязвимой экологической структурой и в то же время обычно служат местами концентрации населения и промышленных зон, зонами интенсивного использования биологических и рекреационных ресурсов. Доминирование речного стока или морских вод либо их совместное влияние зависит от типа эстуария и географического положения и обуславливает особенности формирования продуктивности и, в частности, скорость эвтрофирования. Как крайние типы эстуарных экосистем, в которых по-разному проявляются факторы среды, можно рассмотреть дельту Волги, Калининградский (Вислинский) и Куршский заливы Балтийского моря. Дельта Волги характеризуется доминированием речного стока, указанные заливы — различной степенью интенсивности водообмена с морем.

Дельта Волги — одна из крупнейших в мире. Выделяют собственно дельту и авандельту — предустьевое взморье, которые представляют собой зоны транзита речных вод. Речной сток Волги столь велик (около 250 км<sup>3</sup>/год), что влияние Каспийского моря слабо сказывается на процессах в дельте. Со строительством и введением в эксплуатацию водохранилищ Волжско-Камского каскада начиная с 1961 г. режим стока Волги характеризуется как зарегулированный и в большой степени определяется попусками расположенной выше по течению системы водохранилищ. За период зарегулированного стока в дельте произошли значительные трансформации условий среды из-за колебаний водного стока, меняющегося уровня поступления биогенных веществ и других антропогенных и природных факторов.

Калининградский и Куршский заливы можно рассмотреть в качестве типичных лагунных экосистем, которые соединяются с морем узкими проливами [8, с. 1]. Это крупнейшие лагуны Балтийского моря, относящиеся к высокопродуктивным водоемам. Экосистемы находятся под сильным воздействием природных (заток морских вод и речной сток) и антропогенных (поступление биогенных и загрязняющих веществ) факторов. Лагуны существенно различаются по величине материкового стока и солёности. Калининградский залив — лагунная экосистема «полуоткрытого» типа с интенсивным притоком морских вод благодаря слабому речному стоку и фронтальному положению пролива относительно преобладающих ветров, вызывающих нагон морской воды. Куршский залив — лагунная экосистема «закрытого» типа, ему свойственен слабый водообмен с морем из-за большого стока р. Неман и узости морского пролива, расположенного в суженной части, и его «теневого» положения относительно преобладающих ветров. Соотношение объема пресных вод, стекающих с суши, и объема поступающей морской воды составляет 1:5 в Калининградском заливе и 4:1 в Курш-



ском. Первый залив солоноватоводный, а второй — преимущественно пресноводный водоем. По другим показателям (тип грунтов, глубины, температурный режим) заливы сходны.

Исследуемые эстуарии (дельта Волги, Калининградский и Куршский заливы) и их водосборные площади расположены в густонаселенных районах с интенсивно развитой промышленностью, сельским хозяйством. Интенсивная внешняя биогенная нагрузка в XX в. способствовала эвтрофированию их экосистем, что отразилось на планктонных сообществах и биологической продуктивности.

Целью исследований было по результатам собственных и литературных данных оценить многолетнюю изменчивость продукции фитопланктона и уровня эвтрофирования и влияния природных и антропогенных факторов в трех разнотипных эстуариях (дельта Волги, Калининградский залив и Куршский залив).

### Материал и методика

Исследования российской акватории Калининградского и Куршского заливов выполнялись ежемесячно с марта-апреля до октября-ноября в 1991—2010 гг. Гидрологические, гидрохимические и биологические показатели (включая первичную продукцию и хлорофилл) определялись на 9—12 станциях. Исследования в нижней зоне дельты и авандельте р. Волги выполнялись ежемесячно с марта-апреля до ноября в 1994—2007 гг. на базе Астраханского биосферного заповедника. Гидрологические и гидробиологические показатели (включая первичную продукцию и хлорофилл) определялись на 8 станциях. Гидрологические, гидрохимические и биологические показатели измеряли по стандартным методикам, первичную продукцию и деструкцию — кислородной модификацией скляночного метода, хлорофилл — спектрофотометрическим методом [3, с. 16; 7, с. 1].

### Результаты и обсуждение

#### *Дельта Волги*

Сезонная динамика и пространственное распределение продуктивности фитопланктона нижней зоны дельты и авандельты Волги в большой степени зависят от объема водного стока и особенностей его внутригодового распределения. Весной, с началом половодья, поступление вод, обогащенных биогенными веществами, обеспечивает массовое развитие фитопланктона, увеличение интенсивности фотосинтеза и концентрации хлорофилла. С наступлением межени за счет оттока обогащенной биогенами воды с затопляемых площадей поймы и дельты наблюдается летне-осеннее увеличение развития фитопланктона и его продуктивности в протоках. Объем весеннего половодья определяет площадь затопления земель, что, в свою очередь, в большой степени обуславливает количество поступающих биогенов и отражается на продуктивности фитопланктона.

Наиболее равномерное пространственное распределение фитопланктона и его продуктивности наблюдается в период весенне-лет-



него половодья, так как высокие уровни воды и скорости течения обеспечивают относительно однотипные условия, и происходит транзитный снос фитопланктона. Большая неравномерность наблюдается до начала половодья и в летне-осеннюю межень в связи с особенностями гидрологических и гидрохимических условий.

Современный трофический статус дельты Волги (1994–2007 гг.) можно оценить как мезотрофный по классификации [2, с. 108]. Первичная продукция в нижней зоне дельты составляла от 34 до 63 гС · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>, а среднее за вегетационный период содержание хлорофилла «а» – от 2,7 до 9,1 мг/м<sup>3</sup> (рис. 1, 2).

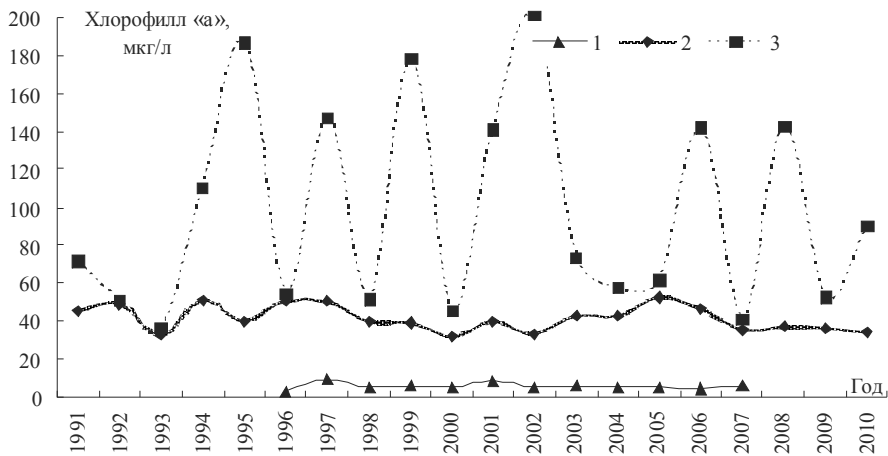


Рис. 1. Среднее для вегетационного периода (апрель – октябрь) содержание хлорофилла в дельте Волги (1), Калининградском заливе (2) и Куршском заливе (3)

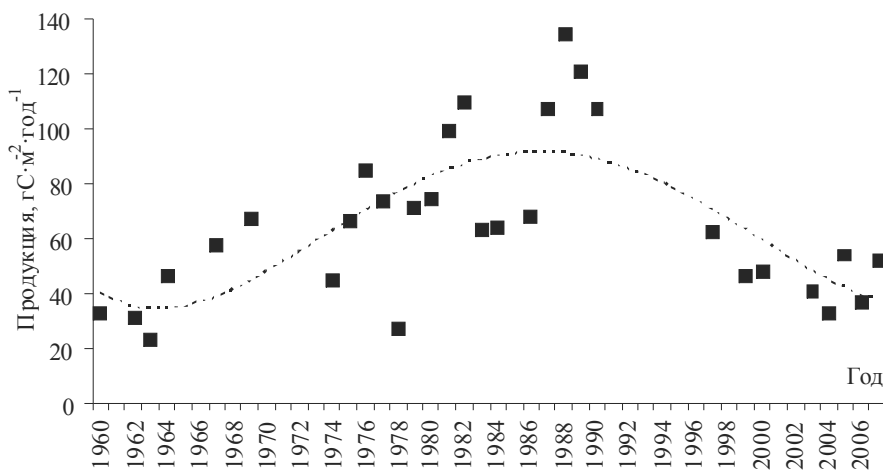


Рис. 2. Первичная продукция планктона в дельте Волги (данные: 1960–1990 гг. – К. В. Горбунова [4; 5], 1997–2004 гг. – наши)



Ретроспективный анализ данных с середины XX столетия в дельте Волги в условиях зарегулированного стока выявил значительное изменение показателей продуктивности фитопланктона. Минимальная первичная продукция наблюдалась в период 1961–1970 гг., характеризующийся средней водностью. В последующем в маловодный период 1971–1977 гг. продукция возросла более чем в 1,5 раза и в среднем составила около  $70 \text{ гС} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$  (рис. 2). В последующий многоводный период 1977–1990 гг. увеличение продукции фитопланктона продолжалось с несколько меньшей скоростью, достигнув показателей, превышающих начальный уровень фазы зарегулированного режима стока в 2 раза, составив в среднем  $85 \text{ гС} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$  и в отдельные годы достигая эвтрофного уровня (выше  $100 \text{ гС} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ ) [4, с. 155; 5, с. 12]. В современный период (1997–2008 гг.) первичная продукция значительно уменьшилась, приблизившись к показателям начального периода зарегулированного стока (1960-х гг.). В сезонной динамике продукции планктона наибольшие изменения отмечены для летне-осенней межени.

Одним из важнейших факторов, обуславливающих многолетний уровень продуктивности фитопланктона и его сезонную динамику, является наличие в воде биогенных веществ. Содержание минеральных форм фосфора и азота за период зарегулированного стока Волги значительно менялось и определялось хозяйственной деятельностью на территории водосборного бассейна, который составляет для Волги 1,38 млн км<sup>2</sup> и охватывает большую часть европейской территории России. Вплоть до конца 1980-х — начала 1990-х гг. происходило повышение содержания биогенов: концентрация минеральных форм азота в воде увеличилась в 1,5 раза, фосфора — в 2, что способствовало увеличению первичной продукции и достижению вод дельты Волги в 1980-х гг. эвтрофного уровня. В 1990–2000-х гг. произошло сильное снижение содержания минерального азота, что в значительной степени связано с уменьшением поступления с сельскохозяйственных угодий, а концентрация фосфора практически не изменилась. В результате первичная продукция вновь снизилась до мезотрофного уровня, как в 1960–1970-е гг. Это в целом отражает общую закономерность уменьшения уровня эвтрофирования в крупных водоемах (водохранилища, озера и др.) России после экономического кризиса в 1990-х гг.

Важным фактором, влияющим на величину первичной продукции в отдельные годы, является водный сток, который определяет уровень поступления биогенов. Важен как общий годовой объем стока, как и характер внутригодового распределения и продолжительность половодья. Поступление биогенов с водосборной площади, в том числе с сельскохозяйственных угодий, в маловодные годы намного меньше, чем в многоводные, что обусловлено как их смывом, так и характером протекающих биохимических процессов. Более высокая продукция приурочена к средним и умеренно многоводным годам, а более низкая — к маловодным и экстремально высоким по водному стоку годам. Многолетние тенденции изменения первичной продукции определяются общим поступлением биогенов, включая антропогенную составляющую.



## Калининградский залив

Калининградский залив, который можно отнести к лагунам «полукрытого» типа [8, с. 4], в наибольшей степени подвержен воздействию природных (интенсивный водообмен, заток морских вод) и антропогенных факторов (поступление промышленных и бытовых сточных вод), оказывающих влияние на первичную продукцию и эвтрофирование вод. Для водоема, в котором происходит интенсивное перемешивание речных и морских вод, характерна выраженная неоднородность пространственного распределения гидрохимических и гидробиологических показателей. Максимальные концентрации биогенов (азот, фосфор) в течение всего года свойственны для восточной части залива и Приморской бухты. Эти районы подвергаются постоянному загрязнению сточными водами (Калининграда), а также биогенами, смываемыми с водосборной площади и поступающими со стоком р. Преголя. В районах, расположенных вблизи морского пролива, концентрации биогенов минимальны из-за разбавляющего влияния морских вод. Несмотря на многократное уменьшение поступления биогенов (азота и фосфора) с водосборной площади в 1990–2000-х гг., для залива в современный период характерны их высокие концентрации, однако эвтрофирование вод не больше критического для экосистемы уровня, чему способствуют проточность, значительный водообмен с морем, мелководность и хорошая перемешиваемость.

В Калининградском заливе достаточно малая межгодовая изменчивость гидрохимических и гидробиологических показателей трофического статуса (рис. 1). В современный период (2001–2010 гг.) по величинам первичной продукции ( $316–512 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ) и содержанию хлорофилла «а» ( $32–52 \text{ мг/м}^3$  в среднем за вегетационный период) рассматриваемый залив можно оценить как эвтрофный водоем, приближающийся к гиперэвтрофному согласно трофической классификации [2, с. 108]. Его особенность – несоответствие между величинами хлорофилла, на основе которых водоем можно оценить как эвтрофный, и общего фосфора, содержание которого выше границы, свойственной для гиперэвтрофных водоемов. Концентрация общего фосфора характеризует нагрузку на водоем и его потенциальную возможность достичь определенного уровня биологической продуктивности, а концентрация хлорофилла (как показателя обилия фитопланктона) отражает сам уровень трофности водоема [6, с. 133]. Эвтрофирование Калининградского залива не достигает потенциально возможного уровня. Важен для снижения трофности значительный водообмен с морем. Высокая проточность и соленость воды из-за интенсивного притока морских вод препятствует интенсивному длительному «цветению» синезеленых водорослей. Как следствие, для данного залива характерна слабая связь между концентрацией биогенов, продукцией и обилием фитопланктона (содержанием хлорофилла).

Значительное снижение внешней биогенной нагрузки в период экономического кризиса в 1990-х гг. привело в Калининградском заливе к двух- или трехкратному снижению общего фосфора с 300 до 100–150 мкгР/л в 1991–1995 гг. и стабилизации на этом уровне в последующие годы. Мож-



но было ожидать также снижения в 1990-х гг. уровня эвтрофирования залива, однако содержание хлорофилла, одного из ключевых показателей, существенно не изменилось. Среднемноголетняя первичная продукция ( $\approx 420 \cdot \text{гС} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1})$ ) в начале XXI в. примерно на 30 % выше, чем в середине 1970-х гг., что свидетельствует о продолжающемся эвтрофировании залива, несмотря на снижение внешней биогенной нагрузки в 1990–2000 гг. Природные факторы (интенсивный водообмен, заток морских вод) определяют уровень обилия и продукции фитопланктона и, как следствие, эвтрофирования вод залива, тогда как влияние антропогенных факторов, обуславливающих внешнюю нагрузку, меньше.

Более интенсивный водообмен с морем в «полуоткрытой» лагунной экосистеме Калининградского залива способствует аутвеллингу (выносу) биогенных и органических веществ через пролив в Балтийское море, снижению внутренней биогенной нагрузки и снижению антропогенного загрязнения водоема.

### Куршский залив

Куршский залив относится к лагунам «закрытого» типа [8, с. 4]. В современный период по гидрохимическим и гидробиологическим показателям его можно характеризовать как гиперэвтрофный водоем [2, с. 108]. Первичная продукция в 2001–2010 гг. составляла 360–668  $\text{гС} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ , а среднее за вегетационный период содержание хлорофилла «а» – 36–210  $\text{мг}/\text{м}^3$  (рис. 1).

Данный водоем – один из самых высокопродуктивных в Европе, включая и морские акватории. Эвтрофирование отражается на всех трофических уровнях, и прежде всего на низших (бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон). Летом и осенью наблюдается массовое развитие синезеленых водорослей, приводящее к «цветению» воды. Заливу свойственна большая межгодовая изменчивость (в 2–4 раза) показателей, характеризующих трофический статус водоема, в частности первичной продукции и содержания хлорофилла (рис. 1). Самые высокие величины этих показателей наблюдаются в годы развития синезеленых водорослей до уровня «гиперцветения» и соответствуют годам максимального прогрева воды.

Несмотря на многократное уменьшение поступления биогенных элементов с водосборной площади в 1990-х гг., улучшения экологической ситуации на акватории Куршского залива не наблюдается. В 1980–2000-х гг. биомасса синезеленых водорослей (*Aphanizomenon flos-aquae* и другие) в летний период всегда была на уровне «интенсивного цветения» (более 10  $\text{г}/\text{м}^3$ ), а в течение 12 сезонов достигала состояния «гиперцветения» (более 100  $\text{г}/\text{м}^3$ ), из них 9 отмечались после 1991 г. [1, с. 104; 9, с. 56]. В годы «гиперцветения» биомасса фитопланктона превышает уровень, при котором наступает биологическое загрязнение.

Причина продолжающихся процессов эвтрофирования Куршского залива, несмотря на многократное уменьшение поступления биогенов с водосборной площади, по-видимому, в том, что на современном этапе доминирующая роль в указанных процессах принадлежит внутриводо-



емной биогенной нагрузке (за счет аккумуляции соединений фосфора и азота в донных отложениях), которая соизмерима с существовавшей ранее внешней нагрузкой. В гиперэвтрофных водоемах, к которым относится и рассматриваемый залив, внутренняя нагрузка может превышать внешнюю, и на определенной стадии развития функционирование системы биогены-фитопланктон может уже не зависеть от их поступления извне. Продолжающемуся эвтрофированию способствует потепление климата. Установлена прямая зависимость между прогревом воды ( $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и началом «гиперцветения» синезеленых водорослей. Повышение температуры воды, в частности увеличение числа «теплых» лет в 1990–2000-х гг., в сочетании с рядом иных факторов создает условия «гиперцветения» водорослей. Наиболее сильно процессы эвтрофирования и «цветения» воды выражены в южной и центральной частях Куршского залива, где сочетаются другие благоприятные условия для развития водорослей: отсутствие затока морской воды и пресноводность, а также замедленный водообмен (его скорость в этой части – около  $1\text{ год}^{-1}$ ).

Среднегодовое первичная продукция ( $\approx 500\text{ гС} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ ) в начале XXI в. примерно на 60 % больше, чем в середине 1970-х гг., что свидетельствует о значительном эвтрофировании «закрытой» лагуны в условиях «цветения» водорослей. Превышение первичной продукции над деструкцией в планктоне (на 50–60 %) и замедленный водообмен ( $\approx 1\text{ год}^{-1}$ ) ведут к накоплению органики в воде и донных отложениях, увеличению внутренней биогенной нагрузки и дальнейшему эвтрофированию лагуны.

### Выводы

По результатам собственных и литературных данных проанализированы многолетняя изменчивость продукции фитопланктона, уровня эвтрофирования и влияние природных и антропогенных факторов в дельте Волги, Куршском и Калининградском заливах Балтийского моря.

Дельта реки Волги – одна из крупнейших в мире, в ней многие процессы определяются речным стоком. На протяжении XX в. здесь происходили значительные изменения условий, связанные с регулированием стока и меняющимся уровнем поступления биогенов, и эвтрофирование дельты реки, достигшее максимума к концу 1980-х – началу 1990-х гг. В 1990-е гг. резко сократилось применение удобрений и поступление биогенов. В современный период в дельте Волги, характеризующейся высокой скоростью водообмена за счет речных вод, наблюдаются процессы деэвтрофирования, в частности уменьшение продукции фитопланктона до мезотрофного уровня.

Куршский и Калининградский заливы – крупные лагуны, относящиеся к самым высокопродуктивным водоемам Европы. Многократное снижение в 1990–2000-х гг. внешней биогенной нагрузки не привело к улучшению экологической ситуации. В современный период в отличие от многих внутренних и прибрежных морских вод в Калининградском и Куршском заливах, где скорость водообмена многократно ниже, чем в дельте Волги, продолжают процессы эвтрофирования. Оно достигает





максимума в «закрытой» пресноводной лагунной экосистеме Куршского залива, где участились «гиперцветения» синезеленых водорослей и наблюдается гипертрофное состояние вод. В «полуоткрытой» солоноватоводной лагунной экосистеме Калининградского залива благодаря интенсивному водообмену с морем процессы эвтрофирования проходят значительно медленнее, первичная продукция ниже и наблюдается эвтрофное состояние вод.

### Список литературы

1. Александров С. В., Дмитриева О. А. Первичная продукция и показатели фитопланктона как критерии эвтрофирования Куршского залива Балтийского моря // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, №1. С. 104–110.
2. Бульон В. В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб., 1994.
3. Бульон В. В. Первичная продукция планктона // Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах: фитопланктон и его продукция. Л., 1981. С. 16–32.
4. Горбунов К. В. Влияние зарегулирования Волги на биологические процессы в ее дельте и биосток. М., 1976.
5. Горбунов К. В. Состояние фито- и бактериопланктона водоемов низовьев дельты Волги // Материалы отчетной сессии научного отдела Астраханского госзаповедника за 1986–1990 гг. Астрахань, 1991. С. 12–14.
6. Коплан-Дикс И. С., Крыленкова Н. Л., Милиус А. Ю., Стравинская Е. А. Возможность количественной оценки пространственной неоднородности уровня трофии озер // Антропогенное перераспределение органического вещества в биосфере. СПб., 1993. С. 132–136.
7. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». М., 1990.
8. Kjerfve B. Coastal lagoons // Coastal lagoon processes. Elsevier science publishers, 1986. P. 1–8.
9. Olenina I. Long-term changes in the Kursiu Marios lagoon: eutrophication and phytoplankton response // Ecologija. 1998. №1. P. 56–65.

### Об авторах

Сергей Валерьевич Александров – канд. биол. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: hydrobio@mail.ru

Юлия Александровна Горбунова – канд. биол. наук, докторант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: hydrobio@mail.ru

### About authors

Dr Sergey Aleksandrov, Associate Professor, I. Kant Baltik Federal University, head of a laboratory, Atlantic Scientific Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography.

E-mail: hydrobio@mail.ru

Dr Yulia Gorbunova, postdoctoral student, I. Kant Baltik Federal University.

E-mail: hydrobio@mail.ru