

*На правах рукописи*

**ГОЛУБКОВ**

**Михаил Сергеевич**

**ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ПЛАНКТОНА  
ВДОЛЬ ГРАДИЕНТА СОЛЕННОСТИ**

**03.02.10 – Гидробиология**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Санкт-Петербург  
2010**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Зоологическом институте РАН

***Научный руководитель:***

доктор биологических наук В.В. Бульон

***Официальные оппоненты:***

доктор биологических наук, профессор И.С. Трифонова  
кандидат биологических наук С.В. Александров

***Ведущая организация:***

Учреждение Российской академии наук Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Защита диссертации состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2010 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.223.02 при Учреждении Российской академии наук Зоологическом институте РАН по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1, факс (812) 328-2941

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Зоологическом институте РАН

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

В.Г. Сиделева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Фотосинтезирующие организмы в процессе фотосинтеза преобразуют энергию солнечной радиации в потенциальную энергию органических соединений и создают в своем теле органическое вещество – первичную продукцию, которая является источником питания последующих звеньев трофической цепи. Исторически сложилось так, что гидробиологические исследования в основном посвящены изучению первичной продукции пресных континентальных водоемов, мирового океана и морей (Винберг, 1960; Бульон, 1983, 1994; Виноградов, 2004 и др.), так как эти акватории всегда рассматривались как экономически важные для человека объекты. Проведенные исследования позволили понять основные закономерности первичной продукции водоемов, определить ключевые факторы внешней среды, влияющие на сообщество автотрофных организмов, и разработать подходы к охране и рациональному использованию водоемов и морских акваторий. Тем не менее, влияние некоторых абиотических факторов на первичную продукцию изучено недостаточно. К таким малоисследованным факторам относится соленость воды. Изменение концентрации минеральных солей в воде воздействует на структуру и функционирование водной экосистемы, в том числе на сообщество автотрофов. Увеличение концентрации солей в водоеме выше 40 ‰ ведет к снижению видового разнообразия населяющих его организмов (Хлебович, 1974). Изучение соленых озер в России началось еще в 19 веке (Geleznov, 1872; Кулагин, 1888). При этом с самого начала затрагивались вопросы формирования уникальных донных отложений этих озер («лечебные грязи») (Перфильев, 1925; Первольф, 1953), которые используются в медицинских целях в течение уже более двух столетий (Каплун, 1892, Ma`or et al., 2006). Кроме того, эти водоемы являются источником полезных ископаемых – различных видов солей, минералов, а также являются важным звеном круговорота углерода на Земле. Исследования первичной продукции в Африке, Австралии и Северной Америки показали, что соленые континентальные водоемы часто являются намного более продуктивными, чем пресные (Williams, 1972; Hammer, 1981). В вопросе влияния на первичную продукцию солености, как внешнего фактора до сих пор нет полной ясности. Для выяснения этого вопроса были проведены исследования первичной продукции в озерах Крымского п-ва с соленостью воды от 26 до 340 ‰. Кроме того, особый интерес представляет изменение величины первичной продукции в градиенте солености в зонах смешения природных вод с разной концентрацией солей. Исследования показывают, что в этих зонах изменяется поведение многих содержащихся в воде веществ (Лисицин, 1988; Артемьев, 1993; Emelyanov, 2005). Однако не до конца ясно, как эти процессы влияют на первичную продукцию фитопланктона. Этот вопрос изучался на примере эстуария реки Невы и Выборгского залива.

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящей работы – дать характеристику первичной продукции планктона и деструкции

органического вещества, определить основные закономерности формирования и функционирования сообщества автотрофных организмов в водоемах с различной концентрации солей и непосредственно в градиенте при смешивании вод с различной соленостью.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценить скорости фотосинтеза и деструкции органического вещества в водоемах с различной концентрацией солей;
- выявить связи величины первичной продукции и деструкции органического вещества с концентрацией общего фосфора, прозрачностью воды и концентрацией взвеси в водоемах с различной соленостью;
- определить роль солености воды, как внешнего фактора, в процессе формирования сообщества автотрофных организмов (фитопланктон-фитобентос-микробиальные маты)
- оценить характер влияния постепенного перемешивания природных вод с различной соленостью и формирования геохимических барьеров на первичную продукцию планктона и деструкцию органического вещества.

**Научная новизна.** Показано, что вдоль градиента солености воды имеется несколько стабильных гидробиологических режимов, в которых доминируют или планктонные или донные продуценты. Изменение солености воды из-за погодных и климатических флуктуаций является важным фактором, определяющим смену гидробиологических режимов в гиперсоленых озерах и лагунах. Показано, что в гиперсоленых озерах умеренной зоны в зимний период создается значительная или даже большая часть годовой первичной продукции фитопланктона, которая затем частично используется в летнее время. Исследовано изменение первичной продукции и деструкции органического вещества вдоль градиента увеличения солености от 0.06 до 7.5 ‰ в эстуарии р. Невы. В зоне перемешивания вод с разной соленостью выделены участки, характеризующиеся различными величинами первичной продукции и деструкции органического вещества. Показано, что в «положительных» эстуариях, где имеет место значительный сток речных вод и подток придонных морских вод, массовое развитие фитопланктона наблюдается на самых ранних стадиях перемешивания и формируется за счет поднятия глубинных вод на поверхность. Повышение скорости деструкции органического вещества наблюдается не только в местах массового развития фитопланктона, но и в зонах, где концентрируется органическое вещество.

**Теоретическое значение** имеет сравнение скорости фотосинтеза планктона и скорости деструкции органического вещества в водоемах с разной соленостью в течение сезона. Обнаружено, что в гиперсоленых водоемах умеренной зоны значительная доля первичной продукции создается в зимний период. Показано влияние солености, как самостоятельного внешнего фактора среды, так и в совокупности с другими факторами, на формирование основного автотрофного компонента и его продуктивности в водоемах с различной соленостью воды. Определены механизмы смены гидробиологических режимов в мелководных соленых озерах. Определен

механизм изменения первичной продукции планктона и деструкции органического вещества внутри геохимического барьера, возникающего при смешении вод с различной соленостью воды.

**Практическая ценность работы.** Работа выполнена в рамках международного проекта INTAS, в ходе которого было проведено комплексное сравнительное эколого-гидробиологическое изучение мелководных соленых озер и лагун различного генезиса, расположенных на территории Крымском п-ва. Результаты исследования позволили лучше понять роль этих водоемов в глобальном цикле углерода и выявить основные особенности функционирования планктонного автотрофного компонента. В рамках проекта при непосредственном участии автора создана общедоступная on-line база данных по биологическим характеристикам соленых озер и лагун Европы, которая размещена на сайте Зоологического ин-та РАН. Проведенная работа может быть использована при разработке мер по охране и рациональному использованию мелководных соленых озер и лагун.

В эстуарии р. Невы исследование проходило в рамках федеральной целевой программы правительства РФ «Мировой океан». Показано, что зона комплексного (гидродинамического и физико-химического) геохимического барьера эстуария наиболее подвержена процессу евтрофирования. Полученные данные были использованы для современной оценки направленности, степени и скорости развития процесса евтрофирования эстуария р. Невы и Выборгского залива. На основе результатов исследования были предложены принципы оценки и прогнозирования процесса евтрофирования для новой системы экологического мониторинга Российских прибрежных акваторий.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были доложены и обсуждены на международных конгрессах по Балтийскому морю (Сопот, Польша, 2005; Росток, Германия, 2007; Таллинн, Эстония, 2009), международных конференциях по экологии лагун (Клайпеда, Литва, 2005; Неаполь, Италия, 2007), международной конференции посвященной 100-летию со дня рождения член-корреспондента РАН Г.Г. Винберга «Водная экология на заре 21 века» (Санкт-Петербург, 2005), международном симпозиуме «Информационные системы и web-порталы по разнообразию видов и экосистем» (Борок, 2006), международном симпозиуме «Изменения экосистем больших озер Европы: экологические и социально-экономические последствия» (Тарту, Эстония, 2006), международном симпозиуме «Эстуарные экосистемы: структура, функции и управление» (Калининград, 2007), международной конференции «Большие морские экосистемы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление)» (Ростов-на-Дону, 2007), международном трехстороннем совещании по экологическим проблемам Финского залива (Хельсинки, Финляндия, 2007), международном экологическом форуме «День Балтийского моря» (Санкт-Петербург, 2008), Европо-американской международной конференции по экологическим проблемам Балтийского моря (Таллинн, Эстония, 2008), российско-

китайском симпозиуме «Механизмы эвтрофирования озер и стратегии их восстановления» (Ухань, Китай, 2009), X съезде Гидробиологического общества РАН (Владивосток, 2009), на отчетной научной сессии ЗИН РАН (2003, 2006, 2009), на научных семинарах лаборатории пресноводной и экспериментальной гидробиологии Зоологического института РАН (2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 статей, из них в изданиях рекомендованных ВАК – 9.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 247 страницах, включает 35 таблиц, 41 рисунок. Состоит из введения, 7-ми глав и выводов. Список литературы включает 246 наименования, из них 163 иностранных источника.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.б.н. В.В. Бульону за общее научное руководство и неоценимую помощь в подготовке экспериментов, обсуждении и оформлении результатов. Выражает глубокую признательность Л.П. Умновой за помощь в выполнении химических анализов, Ю.И. Губелит за помощь в определении видового состава водорослей соленых озер Крымского п-ва, к.б.н. Н.В. Шадрину (ИнБЮМ НАНУ) и О.Ю. Еремину за помощь в проведении полевых работ, определении морфометрических характеристик, температуры и солености в соленых озерах Крымского п-ва, к.ф.-м.н. Т.Р. Ереминой (РГГМУ), команде катамарана «Centaurus-2» (Г. Башкиной, С. Харькову, А. Коровину, Ф. Башкину, А. Курило, С. Виноградову) за помощь в проведении полевых работ в эстуарии р. Невы и Выборгском заливе, определении солености и температуры воды.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### **Глава 1. Обзор литературы. Соленость воды и продуцирование органического вещества в водах с различной соленостью**

В первой части главы 1 рассмотрено понятие солености воды природных вод. Приведены различные определения этого понятия, используемые в разных областях естественнонаучных знаний при изучении океанических, континентальных и подземных вод. Приведены примеры основных минеральных солей содержащихся в природных водах, основные методики определения их концентраций и примеры различных способов классификаций вод по содержанию солей. Обсуждено влияние солености воды как фактора воздействующего на структуру экосистемы и формирование ее автотрофного компонента. Приведен обзор основных трудностей, с которыми сталкиваются организмы при повышении концентрации солей в воде. Продемонстрированы основные направления хозяйственного использования соленых водоемов, как с точки зрения минеральных ресурсов, так и биологических.

На примере эстуариев рассмотрены процессы, происходящие при смешении речных и морских вод, и градиенты, создающие геохимические

барьеры. Приведены различные классификации зон смешения природных вод. Согласно современной классификации эстуариев по гидродинамическим особенностям перемешивания вод они могут быть подразделены на положительные, отрицательные и нейтральные (McLusky, Elliot, 2004). «Положительные» эстуарии формируются в тех случаях, когда сток реки превышает величину испарения с поверхности эстуария. В результате пресная вода распространяется по поверхности достаточно далеко от устья. В придонном слое воды эстуария возникает компенсационное течение более соленых и тяжелых морских вод в сторону устья. Перемешивание идет постепенно и с перекосом в вертикальном направлении, в результате у поверхности вода более пресная, чем у дна. «Отрицательные» эстуарии наблюдаются тогда, когда количество воды, испаряющееся с поверхности эстуария, выше, чем сток реки. Речная и морская вода распространяются по поверхности, в зоне смешения часть воды испаряется, соленость поверхностного слоя увеличивается, он опускается вниз, в результате возникает течение от поверхности на дно и в сторону моря. Этот тип эстуариев характерен для аридных областей и рек с небольшим расходом воды. Промежуточный вариант между выше описанными типами – «нейтральные» эстуарии. Количество испаряющейся с поверхности эстуария воды эквивалентно величине речного стока. Перемешивание морской и речной воды идет постепенно на достаточно протяженной территории, с моря идет подток соленой воды, а со стороны реки пресной.

Во второй части главы 1 дается обзор современного состояния изученности процессов фотосинтеза и создания первичной продукции в водоемах с различной концентрацией солей. Продемонстрированы изменения процесса фотосинтеза от бактерий, осуществляющих аноксигенный фотосинтез, до водорослей. Даны примеры основных изменений, происходящих в ходе эволюции водных организмов, направленных на оптимизацию и наибольшую энергетическую эффективность процесса фотосинтеза. Приведены примеры и рассмотрены принципы классификаций водоемов и океанических вод по трофическому статусу, основанные на величинах создаваемой в них первичной продукции.

## **Глава 2. Материал и методы**

Материал для настоящей работы был собран автором в период с 2003 по 2008 год. Исследования структурных и функциональных характеристик экосистем мелководных соленых озер выполнялись в ходе четырех экспедиций ЗИН РАН на озера Крымского полуострова, проводившихся в 2004-2005 гг. совместно с институтом Биологии южных морей НАН Украины и институтом Микробиологии им. Виноградского РАН. В течение этих экспедиций автором изучались продукционно-деструкционные характеристики фитопланктона и фитобентоса, а также некоторые гидрохимические показатели для 7 озер с соленостью воды от 24 до 340 ‰. В 2004-м году исследования проводились в августе, в 2005 г. были проведены три экспедиции: в марте, августе и декабре. В 2003-2008 гг. автор принимал

участие в совместных экспедициях Зоологического ин-та РАН и Российского государственного гидрометеорологического университета, проводимых в эстуарии реки Невы и Выборгском заливе в конце июля начале августа во время летнего максимума развития фитопланктона. В ходе этих выездов автором изучались изменения продукционно-деструкционных характеристик фитопланктона и гидрохимических показателей вдоль градиента солености от 0.06 до 7.5 ‰. В качестве дополнительных параметров использовались данные по солености, прозрачности и температуре воды, измеренные в момент отбора проб. Также были использованы данные метеорологических наблюдений (температура воздуха, сила и направление ветра, значение индекса северо-атлантической циркуляции (NAO)).

Первичная продукция и деструкция органического вещества измерялась методом темных и светлых склянок в кислородной модификации (Бульон, 1994). Концентрацию фотосинтетических пигментов водорослей во всех исследованных акваториях определяли спектрофотометрическим методом (Strickland, Parsons, 1968). Концентрацию общего фосфора определяли методом сжигания проб нефилтрованной воды в смеси концентрированной  $H_2SO_4$  и персульфата калия при температуре  $150^{\circ}C$  в термостате в течении двух часов. В результате сжигания весь фосфор переходил в минеральную фракцию, концентрацию которого определяли молибдатным методом (Strickland, Parsons, 1968) с добавлением аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя. Концентрацию сестона (Сст) определяли гравиметрическим методом. Концентрацию взвешенного органического вещества (Свов) определяли методом бихроматного окисления (Golterman, 1969). Концентрацию взвешенного минерального вещества (Свмв) рассчитывали по разнице между Сст и Свов. Прозрачность воды определялась с помощью белого диска Секки. В соленых озерах Крымского п-ва соленость воды измерялась с помощью рефрактометра. В эстуарии р. Невы и Выборгском заливе температура (Т) и соленость (S) воды измерялись с помощью термосолезонда CTD48M фирмы Sea&Sun Technology с временным шагом 1 сек., что приблизительно соответствовало 10 см. Профиля вертикального распределения температуры и солености воды в эстуарии р. Невы и Выборгском заливе были построены с использованием программы Surfer Golden. Общий объем обработанного материала составляет 546 определений скорости фотосинтеза и деструкции органического вещества, 786 определений концентрации хлорофилла *a*, 790 определений концентрации общей взвеси и 790 определений концентрации взвешенного органического вещества, 850 определений концентрации общего фосфора.

### **Глава 3. Краткая физико-географическая, гидрологическая и гидрохимическая характеристика исследованных озера Крымского п-ва и акваторий Финского залива**

Озера Крымского п-ва расположены в аридной климатической зоне, подзоне сухих степей. Среднегодовое количество осадков равно 300 мм, испарение – 1000 мм в год. Среднегодовая температура воздуха составляет

11°C, самый холодный месяц – январь с среднесуточной температурой –2.5 °С, самый теплый период – конец июля начало августа, в это время среднесуточная температура составляет 24 °С (Хантулева, Растворова, 1980). Для территории характерны постоянно дующие ветра, в основном, в юго-западном и северо-восточном направлениях. Благодаря высокой солености воды исследованные озера не замерзают даже в самый холодный период года. Средняя глубина озер – от 0.35 до 1.10 м, площадь водного зеркала – от 0.07 до 20.0 км<sup>2</sup>. Все озера гомотермны из-за малой глубины и постоянного ветрового перемешивания. В декабре температура воды в них была в пределах 3.5-5°C, в августе – 23-34°C. Пять исследованных озер расположены на юго-востоке Крымского п-ва – Керченском п-ве, одно озеро находится в северо-западной и одно – в юго-западной частях Крымского п-ва. Исследованные озера по происхождению делятся на два типа. Первый тип – прибрежные озера, морского происхождения, представляют собой лиманы, отделенные от Черного моря косами, сложенными несцементированным ракушечником и песком. Уровень воды в озерах находится на уровне моря, либо немного ниже. Второй тип – континентальные озера, удаленные от моря. Все они находятся на Керченском п-ве на высоте 25-120 м выше уровня моря. Озера расположены в центре овальных воронок с пологими склонами. Озера морского происхождения по солевому составу относятся по классификации О.А. Алекина (1970) к хлоридно-сульфатному классу, группе натрия. Это указывает на их тесную связь с Черным морем. Ионный состав континентальных озер также отражает их морское происхождение, однако из-за обособленности от моря произошла метаморфизация солевого состава. Соотношение хлоридных и сульфатных ионов изменилось в сторону сульфатно-хлоридного класса, группы натрия.

Эстуарий р. Невы и Выборгский залив (залив второго порядка) расположены в восточной части Финского залива Балтийского моря, находящейся в гумидной климатической зоне, подзоне южной тайги. Годовая сумма осадков составляет 600 мм, испарение – 450 мм в год. Среднегодовая температура равна 4 °С, среднесуточная температура в январе – –7.6 °С, в июле – 17 °С (Хантулева, Растворова, 1980). Согласно классификации эстуариев по гидродинамическим характеристикам (McLusky, Elliot, 2004) эстуарий р. Невы относится к типу «положительных» эстуариев. Пресные воды реки Невы распространяются в сторону моря по поверхности, а у дна формируется компенсационное течение более соленых вод, направленное со стороны моря к устью реки. В Выборгском заливе, ввиду низкого расхода воды Сайменского канала, перемешивание идет постепенно, поэтому он может быть отнесен к типу «нейтральных» эстуариев. Отсутствие приливов и отливов в эстуарии реки Невы и Выборгском заливе обеспечивает достаточно постоянную локализацию зон смешения вод.

По видовому составу доминирующих групп гидробионтов, морфометрическим характеристикам и физико-химическим условиям эстуарий р. Невы делится на три большие части (Golubkov et. al., 2003):

верхняя часть – Невская губа; средняя часть – внутренний эстуарий; нижняя часть – внешний эстуарий. Средняя глубина Невской губы – 4 метра, время пребывания воды 2-7 суток (Неелов, Умнов, 1997), соленость воды в период исследований не превышала 0.06 ‰, температура воды была от 18° до 24°С. Во внутреннем эстуарии скорость стокового течения замедляется, глубина увеличивается, достигая у западной границы 30 м. Начинается активное перемешивание речных и морских вод. По мере продвижения на запад соленость воды увеличивалась от 0.06 до 2 ‰, только в 2003 г. соленость поверхностных вод составляла около 4 ‰. Соленость придонного горизонта была значительно выше (до 6 ‰), чем у поверхности. Температура в эпилимнионе составляла от 17 до 23 °С. Температурный скачок располагался на глубине 10-20 метров. Температура придонного слоя воды была 3-6°С.

Во внешнем эстуарии глубина у его западной границы увеличивается до 50 метров, здесь продолжают процессы перемешивания. Соленость поверхностных вод постепенно увеличивалась от 2 ‰ в восточной его части до 3.5 ‰ в западной части. Исключение составлял 2003 г., когда соленость поверхностных вод в этой части эстуария везде была около 4 ‰, а соленость придонного слоя воды – 5-7 ‰. Температура верхнего слоя воды была такая же, как и во внутреннем эстуарии. Температура придонного слоя воды была ниже, чем во внутреннем эстуарии, составляя 3-4°С.

Выборгский залив – мелководный, в верхней части глубина составляет в среднем 6 метров, в средней части – около 12 м и только у выхода она увеличивается до 25 м. В Выборгском заливе водная толща была стратифицирована по температуре не каждый год. Средняя температура эпилимниона была 18-20°С. Около г. Выборга, в месте впадения Сайменского канала, соленость воды составляла около 1.2 ‰, по мере продвижения к выходу из залива увеличивалась до 2.8 ‰. В придонных слоях глубоководных частей залива соленость достигала 5.2 ‰.

Протяженность эстуария р. Невы от устья до наиболее мористой части составляет около 140 км, Выборгский залив от устья Сайменского канала до выхода из залива имеет протяженность 26 км.

Воды Балтийского моря, несмотря на низкую абсолютную концентрацию солей, сохраняют соотношение основных ионов, характерное для мирового океана. Особенностью вод Балтийского моря является повышенная концентрация  $\text{Ca}^{2+}$ , что обусловлено большим поверхностным стоком с водосбора. В верхних частях исследованных эстуариев ионный состав воды практически полностью соответствует составу речных вод. По мере перемешивания, воды переходят из класса гидрокарбонатно-кальциевых в хлоридно-натриевые по классификации О.А. Алекина (1970).

#### **Глава 4. Показатели продуктивности автотрофов в водоемах с различной соленостью**

Сообщество фитопланктона исследованных озер Крыма отличалось невысоким биологическим разнообразием в августе и в декабре 2005 г. Количество различных видов водорослей в озерах колебалось от 4 до 11. В

наиболее соленых озерах (131-340 ‰) как летом, так и зимой по биомассе доминировали зеленые водоросли *Chlamydomonas angulosa* и *Dunaliella salina*. Эти водоросли характерны для наиболее соленых озер мира благодаря их способности накапливать в качестве осмолита глицерин. Глицерин также помогает этим организмам выдерживать низкие температуры (Welsh, 2000). В умеренно соленых озерах (24-61 ‰) – летом по биомассе доминировали динофитовые, а на втором месте были либо цианобактерии, либо криптофитовые водоросли. Зимой в планктоне умеренно соленых озер по биомассе доминировали диатомовые водоросли. В оз. Тобечикском в 2005 г. наблюдалось массовое развитие нитчатых водорослей *Cladophora albida* и *C. vadorum*, биомасса которых летом в среднем составляла 396 г сух. веса/м<sup>2</sup>.

Все исследованные соленые озера Крымского п-ва имели очень высокие концентрации общего фосфора (табл. 1, 2), соответствующие евтрофному и гиперевтрофному классу вод. Такие высокие концентрации фосфора в озерах являются следствием сочетания естественных и антропогенных факторов. Озера, особенно континентального типа, в силу своей геоморфологии аккумулируют вещества, поступающие с поверхностным и грунтовым стоком вод, промывающих окружающую территорию. Поступающий в озера материал включается в биологический круговорот, либо захоранивается в донных отложениях.

Таблица 1.

Размах колебаний средних величин концентрации общего фосфора, концентрации хлорофилла *a* и продукционно-деструкционных показателей в прибрежных озерах Крымского п-ва в августе 2004 г. (1), апреле (2), августе (3) и декабре (4) 2005 г.

Показатель	1	2	3	4
Концентрация общего фосфора, мг/м <sup>3</sup>	175-302	130-705	25-293	32-290
Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м <sup>3</sup>	0.30-4.59	0.80-8.04	0.71-3.79	2.87-49.5
Скорость фотосинтеза планктона на оптимальной глубине, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	0.31-6.87	0.47-2.21	0.83-1.54	1.35-1.95
Интегральная первичная продукция планктона, гС/(м <sup>2</sup> сут.)	0.11-3.18	0.22-0.84	0.19-0.68	0.27-1.45
Деструкция органического вещества в эпилимнионе, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	0.34-2.92	0.21-1.62	0.58-0.87	0.73-1.51
Деструкция органического вещества в столбе воды, гС/(м <sup>2</sup> сут.)	0.16-1.94	0.15-1.57	0.31-0.74	0.29-1.48

Таблица 2.

Размах колебаний средних величин концентрации общего фосфора, концентрации хлорофилла *a* и продукционно-деструкционных показателей в континентальных озерах Крымского п-ва в августе 2004 г. (1), апреле (2), августе (3) и декабре (4) 2005 г.

Показатель	1	2	3	4
Концентрация общего фосфора, мг/м <sup>3</sup>	238-1090	460-2200	510-5625	190-3100
Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м <sup>3</sup>	6.68-15.7	9.72-258	7.00-301	36.6-703
Скорость фотосинтеза планктона на оптимальной глубине, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	3.45-14.9	8.25-34.3	10.9-67.1	2.12-13.2
Интегральная первичная продукция планктона, гС/(м <sup>2</sup> сут.)	2.44-4.60	2.67-4.98	6.01-14.9	1.05-1.14
Деструкция органического вещества в эпилимнионе, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	1.87-7.69	4.20-11.8	7.72-30.1	0.83-1.77
Деструкция органического вещества в столбе воды, гС/(м <sup>2</sup> сут.)	2.06-4.60	4.98-6.41	6.01-35.2	0.85-1.05

Из-за небольшой глубины озер, донные отложения постоянно взмучиваются в водную толщу, а из-за высокой солености и плотности воды взвесь медленно оседает на дно, поэтому для всех исследованных озер Крымского п-ва была характерна очень высокая концентрация взвешенных веществ. Наибольшая концентрация сестона в континентальных озерах была более 7000 г/м<sup>3</sup>. В прибрежных озерах наибольшая Сст была около 890 г/м<sup>3</sup>. В континентальных озерах доля органической фракции в сестоне в среднем составляла 35 %, в прибрежных – 18 %. Для всех озер получена положительная связь между концентрациями сестона и общего фосфора. Причем эта взаимосвязь проявлялась как для органической взвеси ( $r=0.92$ ,  $n=24$ ), так и для минеральной ( $r=0.83$ ,  $n=24$ ). Можно предложить два объяснения положительного влияния взмученного неорганического вещества на содержание этого важного биогенного элемента. С одной стороны, как известно из почвоведения (Ковда, 1985), мобилизация фосфора даже из минералов горных пород осуществляется практически всеми группами микроорганизмов, т.е. минеральная взвесь представляет собой непосредственный источник фосфора в водоеме. С другой стороны, минеральная взвесь является переносчиком вторично сорбированного на ее поверхности и внутри частиц минерального фосфора, который сорбируется благодаря электро-химическим взаимодействиям между минеральными частицами и ионами и соединениями фосфора. Например, гелеподобный

комплекс гидроокиси Fe, образующийся в аэробных условиях, так же как и глинистые минералы, может обладать высокой адсорбционной способностью по отношению к фосфатам (Мартынова, 2008; Rozan et al., 2002).

Высокие концентрации общего фосфора объясняют массовое развитие водорослей в этих озерах. Поэтому в исследованных озерах наблюдались очень высокие концентрации хлорофилла *a* и величины первичной продукции планктона (табл. 1, 2). Скорость фотосинтеза планктона в исследованных озерах показала тесную связь с концентрацией общего фосфора в воде ( $r=0.93$ ,  $n=21$ ). Скорость фотосинтеза планктона на оптимальной глубине не зависела от солености воды. Интегральная первичная продукция планктона на столб воды изменялась от 0.11 до 14.9 гС/м<sup>2</sup>сут (табл. 1, 2). Этот показатель, в отличие от скорости фотосинтеза планктона на оптимальной глубине, обнаруживал более тесную связь с величиной солености воды. Это связано с тем, что интегральная первичная продукция зависит от толщины евфотного слоя. Высокая соленость и, как следствие, плотность воды способствует высокому содержанию взвешенного вещества (из-за снижения скорости оседания взвеси), поэтому наиболее соленые озера отличались наибольшим содержанием сестона в воде, низкой прозрачностью и узкой евфотной зоной, что отрицательно сказывалось на интегральной первичной продукции планктона. В прибрежных озерах с цельной косою летом соленость воды повышалась до 100 ‰ и более. В сообществе зоопланктона начинал доминировать крупный фильтратор *Artemia* sp. (Golubkov et al. 2007). В этот период первичная продукция фитопланктона снижалась, по-видимому, в связи с выеданием водорослей артемией. В пользу такого развития событий говорит отрицательная связь интегральной первичной продукции фитопланктона с биомассой *Artemia* sp. ( $r=0.90$ ). Кроме того, такой эффект воздействия артемии на фитопланктон отмечался и ранее, этот рачок в некоторых гиперсоленых водоемах Австралии используется для контроля нежелательного массового развития фитопланктона (Geddes, Williams, 1987). Деструкция органического вещества в объеме воды в слое оптимального фотосинтеза в прибрежных озерах составляла от 0.34 до 6.10 гС/м<sup>3</sup> в сутки (табл. 1, 2). Деструкция органического вещества, рассчитанная на столб воды, была от 0.15 до 3.05 гС/м<sup>2</sup> в сутки (табл. 1, 2). В зимний период деструкция органического вещества снижалась, по сравнению с летом, причем наиболее заметно в континентальных озерах (табл. 1, 2).

Озера не замерзают и фотосинтез в них идет в течение всего года. Ориентировочный расчет первичной продукции фитопланктона и деструкции органического вещества в озерах в разные периоды 2005 г. показал, что наименьшая годовая первичная продукция (87 гС/м<sup>2</sup>год) за 2005 г. была создана в оз. Кояшском самом соленом из обследованных озер (184-340 ‰), самая большая (1824 гС/м<sup>2</sup>год) в оз. Киркояшском с самой низкой концентрацией солей из исследованных водоемов (24-37.5 ‰). В прибрежных озерах в осенне-зимний период создавалось 55-65% годовой первичной продукции планктона, а в континентальных 11-27 %. Такое

различие, видимо, связано с развитием в прибрежных озерах в летнее время *Artemia* sp. Расчет годовой деструкции показал, что в континентальных озерах количество разлагающегося за год органического вещества на порядок выше (2152-3979 гС/м<sup>2</sup>год), чем в прибрежных озерах (155-480 гС/м<sup>2</sup>год). Во всех озерах, кроме оз. Тобечикского, основная доля органического вещества разлагается в весеннее-летний период. Соотношение годовых величин первичной продукции и деструкции органического вещества показывают, что во всех озерах в весеннее-летний период деструкция органического вещества в два раза превосходила первичную продукцию планктона. Наоборот, в осеннее-зимний период фитопланктоном создавалось столько же или больше органического вещества, чем разлагалось.

В целом можно выделить несколько важных моментов в создании органического вещества планктоном в исследованных озерах. Из-за высокой солености воды озера не замерзали в зимний период. В наиболее соленых озерах в течение всего года доминировали специфические виды зеленых водорослей, такие как *Dunaliella salina*, которые не только способны выдерживать высокую соленость, но и вегетировать при низких температурах воды. В зоопланктоне наиболее соленых, но не подверженных евтрофированию, озер Тобечикском и Кояшском был отмечен рачок артемия. В летний период при его массовом развитии наблюдалось угнетение фитопланктона за счет выедания. В результате, в наиболее соленых озерах в осеннее-зимний период создавалась значительная или даже большая часть годовой первичной продукции фитопланктона. В то же время деструкция органического вещества была более зависима от температуры воды, чем первичная продукция, и в зимний период её величина значительно снижалась. В результате во всех озерах, кроме оз. Марфовского, в зимний период создавалось больше органического вещества, чем разлагалось, т.е. в исследованных соленых озерах зимой происходило накопление органических веществ.

## **Глава 5. Влияние естественных и антропогенных факторов на гидробиологический режим и первичную продукцию соленых озер**

В водоемах первичными продуцентами могут быть как планктонные, так и бентосные организмы. В планктоне сообщество автотрофов может состоять как из одноклеточных водорослей, так и фотосинтезирующих бактерий, а донные автотрофы, кроме того, могут быть представлены макроводорослями и высшей водной растительностью. Современные исследования показывают, что при одинаковых условиях внешней среды, например, при одинаковом стоке биогенных веществ, но при разной структуре сообщества гетеротрофов, в автотрофном сообществе в мелководных водоемах может преобладать как фитопланктон, так и фитобентос. При этом экосистема в обоих случаях будет находиться в стабильном состоянии, обеспечивающем внутри сообщества наиболее полное использование энергии и вещества, как

поступающего извне, так и вновь синтезированного. Это явление получило название *alternative stable states of ecosystem* (Scheffer, 2004), в русском литературном переводе его можно назвать «стабильные гидробиологические режимы» мелководных водоемов. Зная особенности экосистемы можно определить точку ее перехода из одного стабильного состояния в другое. Концепция двух стабильных гидробиологических режимов: «режима чистой воды», где в качестве основных первичных продуцентов выступают макрофиты и «режима мутной воды», где основным первичным продуцентом является фитопланктон, была предложена для пресных мелководных озер подверженных евтрофированию (Scheffer 1989, 2004; Scheffer, Carpenter, 2003), и была успешно применена в Голландии для борьбы с евтрофированием озер с помощью метода биоманипуляции (Meijer, 1999; Strachlow et al. 2005; Scheffer, van Nes, 2007).

Эта концептуальная модель стабильных гидробиологических режимов была недавно успешно использована австралийскими учеными для выяснения влияние засоления и евтрофирования на экосистемы озер и заболоченных территорий (Davis et al. 2003; Timms 2005; Sim et al. 2006; Segal et al. 2006). Согласно предложенной ими схеме при средней солености воды и относительно невысоком стоке биогенных элементов в экосистеме в качестве основных первичных продуцентов выступают макрофиты, сообщество которых состоит из небольшого количества солеустойчивых видов (например, рода *Ruppia*), а с увеличением солености воды экосистема переходит в другое стабильное состояние, где первичная продукция создается донными бактериальными матами. Эта модель была успешно применена для описания изменения экосистем в результате осолонения соленых болот в Австралии.

Исследование, проведенное на мелководных соленых озерах Крымского п-ва, показало, что экосистемы этих озер могут быстро переходить от одного режима к другому. В прибрежном оз. Тобечикском в 2004 г. наблюдался «режим мутной воды» когда в качестве основного первичного продуцента выступал фитопланктон. В 2005 г. он сменился на «режим чистой воды» где основная доля первичной продукции создавалась нитчатými водорослями, покрывающими дно озера. В результате скорость фотосинтеза планктона в оз. Тобечикском в августе 2005 г. сократилась в 8 раз, его интегральная первичная продукция – в 4.5 раза, а концентрация хлорофилла *a* в планктоне упала в 6.5 раз по сравнению с августом 2004 г. В то же время в 2005 г. на дне озера сформировался сплошной «ковёр» из нитчатых макроводорослей (*Cladophora vadorum* и *Cl. albida*), средняя общая биомасса которых составляла  $392 \pm 25$  г сух. веса/м<sup>2</sup>, а продукция – 47 гС/м<sup>2</sup>сут.

Причины таких изменений, по-видимому, были связаны с глобальными климатическими колебаниями, о которых можно судить, например, по индексу северо-атлантической циркуляции (NAO). Северо-атлантическая циркуляция формирует погодные условия на территории Европы. Индекс NAO рассчитывается как разница между атмосферным давлением в экваториальной и северной части Атлантического океана и представляет

собой комплексный климатический показатель (Hurrell, 1995; Dickson et al., 1996; Hurrell, Van Loon, 1997; Corti et al., 1999). Данные National and Atmospheric Administration (США) ([www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml)), показывают, что в 2004 г. NAO был положительным, а в 2005 г. – отрицательным. Это означает, что в 2004 г. погода в Европе, и в частности на Керченском п-ве, была относительно дождливой, холодной и ветреной, а в 2005 г., наоборот, более теплой и менее ветреной. Рассчитанная, на основе метеорологических данных, средняя температура воздуха на Керченском п-ве в 2005 г. была выше, чем в 2004 г. В результате с поверхности оз. Тобечикского в 2005 г. испарялось больше воды, что привело к увеличению концентрации солей в воде озера. В августе 2004 г. соленость воды составляла 57 ‰, а в августе 2005 г. она увеличилась до 100 ‰. Увеличение солености воды в 2005 г. привело к выпадению единственного крупного хищника из экосистемы озера (*Gammarus* sp.), что в свою очередь привело к изменению структуры сообщества зоопланктона, где в 2005 г. стал доминировать крупный фильтратор *Artemia parthenogenetica*. Этот рачок при высоких биомассах может угнетать развитие фитопланктона. Уменьшение концентрации водорослей в столбе воды привело к увеличению прозрачности воды. В 2004 г. прозрачность воды составляла только 0.5 метра, а в 2005 г. увеличилась до дна (более 1 м). Таким образом, создались благоприятные световые условия для развития донных водорослей. Различия погодных условий в 2004 и 2005 гг. не ограничивались разницей в температуре воздуха. Подсчеты показали, что в 2004 г. в период с марта по май было больше ветреных дней по сравнению с 2005 г., поэтому в менее ветреном 2005 г. в начале вегетационного сезона, когда после прогрева воды начинается массовое развитие фитопланктона и макрофитов, ресуспензия донных отложений должна была быть ниже, чем в 2004 г. Слабая ветровая ресуспензия донных отложений в 2005 г. привела к тому, что дна озера стало достигать достаточно света для развития нитчатых водорослей. Кроме того, развитие фитопланктона сдерживалось артемией и в начале вегетационного сезона у кладофоры появилось преимущество перед фитопланктоном. Благодаря этому летом в озере наблюдалась очень большая биомасса кладофоры. Известно, что макрофиты при значительной биомассе могут сдерживать развитие фитопланктона в мелководных озерах, выделяя в воду аллелопатические вещества подавляющие развитие фитопланктона (van Donk, Gulati, 1995; Gross, 1999; Takamura et al., 2003), поэтому можно предположить, что в оз. Тобечикском нитчатые водоросли сдерживали развитие фитопланктона, выделяя в воду вещества, действующие на фитопланктон. Таким образом, в оз. Тобечикском в 2004-2005 гг. в результате изменения погодных условий и увеличения солености воды произошел переход экосистемы от гидробиологического режима с доминированием фитопланктона к другому гидробиологическому режиму с доминированием донных продуцентов.

Другой стороной жизни прибрежных соленых озер, которая контролируется колебаниями погодных условий, является целостность косы

отделяющей озеро от моря. Например, в оз. Бакальском ранее 2004 г., когда коса была цела, а соленость воды выше чем в 2004 г., на дне озера наблюдался сплошной ковер из кладофоры (Шадрин и др., 2004), то есть в озере наблюдался «режим чистой воды». Однако, в 2004 г., когда коса из-за ветровых условий и частых штормов была частично разрушена, озеро перешло к «режиму мутной воды», с высоким уровнем первичной продукции, при этом кладофора на дне отсутствовала. Фактически озеро трансформировалось в закрытую лагуну с соленостью воды чуть выше, чем в море (26 ‰). Ракушечник, слагавший косу, покрыл дно озера сплошным слоем, в итоге в несколько раз уменьшилась ветровая ресуспензия, о чем свидетельствует значительно уменьшившаяся концентрация сестона и в 2005 г. озеро снова перешло к «режиму чистой воды», однако он был вызван не развитием донных продуцентов, а размывом косы.

Таким образом, исследование, проведенное на озерах Крымского п-ва, показало, что изменения погодных условий, связанные с колебаниями климата является ключевым фактором, определяющим смену гидробиологических режимов в водоеме, и через какую цепь (донную или планктонную) будет передаваться основной поток энергии и вещества. Изменчивость является одной из характерных черт мелководных соленых озер, что делает их удобными модельными объектами для изучения механизмов смены гидробиологических режимов. Увеличение или снижение солености воды в этих озерах приводит к смене гидробиологического режима, что в свою очередь приводит к изменению структуры экосистемы, в частности смене основного первичного продуцента «фитопланктон – донные макроводоросли – микробиальные маты». При этом, колебания солености воды наряду с нагрузкой на водоем биогенными веществами являются основным фактором среды ответственным за переход экосистем этих водоемов от одного гидробиологического режима к другому.

Австралийские исследователи составили схему, согласно которой при солености воды менее 50 ‰ и невысокой концентрации биогенных элементов основным автотрофным компонентом выступает фитобентос. Если соленость превышает 50 ‰ и концентрация биогенных элементов достаточно высока, то основным первичным продуцентом становится фитопланктон. При увеличении солености свыше 150 ‰ и низкой концентрации биогенных элементов роль главного первичного продуцента могут играть донные микробиальные маты (Davis et al., 2003). Однако последнее предположение выглядит спорным, так как при высокой концентрации солей происходит их постоянная садка, в результате на дне образуется соляная корка, которая постоянно пополняется новыми порциями выпадающих в осадок солей. В случае если бактериальный мат начнет формироваться на дне в этот период, он будет постоянно засыпаться садящейся солью. Как показали наши наблюдения, в самых соленых озерах Крыма основным первичным продуцентом являлся фитопланктон. Исследования соленых озер Крыма показали, что существует несколько стабильных гидробиологических режимов вдоль градиента солености:

- гидробиологический режим с мутной водой (режим 1), где основным первичным продуцентом выступает фитопланктон (до солености 60 ‰);
- гидробиологический режим с чистой водой (при солености не выше 150 ‰), где основная доля первичной продукции создается либо донными макроводорослями (режим 2а), либо микробиальными матами (режим 2б);
- гидробиологический режим с мутной водой в сильно соленых озерах, где опять доминирует фитопланктон (выше 150 ‰) (режим 3).

Важным элементом перехода от одного гидробиологического режима к другому помимо устойчивости конкретных видов к высокой солености воды являются изменения вдоль градиента солености биотических взаимодействий между видами и условия их существования в водоеме. Так важным механизмом перехода от режима 1 к режиму 2 является усиление пресса зоопланктона на фитопланктон из-за элиминации в экосистеме консументов 2 порядка: рыб и беспозвоночных хищников. Переход от режима 2 к режиму 3 во многом связан с приобретением организмами положительной плавучести в условиях высокой плотности воды, когда дно становится малопригодным для заселения, и уменьшением прозрачности воды из-за снижения скорости осаждения взвеси в высоко соленой воде. Следует также отметить, что при высокой антропогенной нагрузке биогенными веществами (евтрофировании водоема) при любой солености воды будет наблюдаться режим 1, при этом высокая соленость будет усиливать отрицательные последствия евтрофирования, например, способствовать снижению содержания кислорода вплоть до возникновения анаэробных условий.

## **Глава 6. Продукционно-деструкционные процессы в зоне смешивания вод разной солености**

По величинам первичной продукции воды эстуария р. Невы относятся к мезотрофно-евтрофному классу вод, а Выборгского залива – к евтрофному классу вод (табл. 3). Наибольшие величины первичной продукции наблюдались во внутренней эстуарии (табл. 3), где образуется комплексный геохимический барьер (гидродинамический и физико-химический). Приток органического вещества с водосборной площади обеспечивает высокие величины деструкции органического вещества, в результате на большинстве акваторий наблюдается отрицательный баланс органического вещества (табл. 3), т.е. разлагается больше органики, чем создается фитопланктоном.

Принято считать, что в континентальных водоемах развитие фитопланктона лимитируется фосфором, а в морских – азотом. В Невской губе связь между концентрацией хлорофилла *a* и общим фосфором не проявлялась из-за её высокой проточности, в средней части эстуария коэффициент корреляции между этими показателями равнялся 0.47 (n=16), в нижней части – 0.46 (n=27), а в Выборгском заливе  $r=0.65$  (n=8). Низкие коэффициенты корреляции между этими показателями указывают на то, что при смешении соленых морских и пресных вод лимитирующим элементом может быть и азот и фосфор.

Средняя концентрация общего фосфора (ТР) в верхней части эстуария р. Невы в 2003-2005 гг. составляла 60 мг/м<sup>3</sup>, но в 2006-2007 гг. увеличилась более чем в два раза, в среднем, составив 120-150 мг/м<sup>3</sup>. В средней части эстуария концентрация ТР в эпилимнионе в 2003-2006 гг. была 40-50 мг/м<sup>3</sup>, в 2007 г. концентрация ТР увеличилась на порядок, в среднем, составив почти 500 мг/м<sup>3</sup>. В наиболее мористой части эстуария концентрация ТР в эпилимнионе в 2003-2006 гг. изменялась в среднем от 20 до 40 мг/м<sup>3</sup> (табл. 3).

Таблица 3.

Размах колебаний средних величин концентрации хлорофилла *a* и продукционно-деструкционных показателей в Невской губе (1), внутреннем эстуарии (2), внешнем эстуарии (3) и Выборгском заливе (4) в 2003-2008 гг.

Показатель	1	2	3	4
Концентрация общего фосфора в эпилимнионе, мг/м <sup>3</sup>	57.2-150	40.2-492	29.1-38.4	44.0-60.7
Концентрация общего фосфора в гипolimнионе, мг/м <sup>3</sup>		52.2-615	38.6-50.2	55.0
Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м <sup>3</sup>	7.70-14.9	6.10-12.7	1.40-6.46	14.3-33.0
Скорость фотосинтеза планктона на оптимальной глубине, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	0.48-0.74	0.34-1.32	0.18-0.77	0.83-1.97
Интегральная первичная продукция планктона (Аинт), гС/м <sup>2</sup> сут.	0.34-0.83	0.34-2.16	0.53-1.73	0.95-2.00
Деструкция органического вещества в эпилимнионе, гС/(м <sup>3</sup> сут.)	0.24-0.39	0.15-0.46	0.20-0.48	0.18-0.71
Деструкция органического вещества в столбе воды (Динт), гС/(м <sup>2</sup> сут.)	0.82-1.40	1.62-4.35	3.41-6.60	1.24-5.23
Аинт/Динт	0.30-0.78	0.08-0.72	0.13-0.28	0.45-1.14

Достаточно высокие концентрации фосфора в эстуарии р. Невы и Выборгском заливе обуславливают обильное развитие водорослей (табл. 3). Концентрации ТР в гипolimнионе средней части эстуария была на треть выше, чем в эпилимнионе, в нижней части эстуария концентрация фосфора в гипolimнионе была почти в два раза выше, чем в эпилимнионе (табл. 3). В наиболее мористой части эстуария р. Невы и Выборгском заливе в 2005-2006 гг. концентрация общего фосфора в придонном слое воды (1 метр от дна) в два раза превышала концентрацию в выше лежащих слоях, в среднем

составляя 70-90 мг/м<sup>3</sup>. Следовательно, при условии сильного перемешивания водной массы внешнего эстуария и Выборгского залива, дополнительное количество фосфора в евфотный слой могут поступать из придонных горизонтов. В Невской губе и внутреннем эстуарии снижение первичной продукции планктона в 2006-2007 гг. было связано с грунтонамывными мероприятиями, проводимыми на этих акваториях в те годы. Эти работы привели к многократному снижению прозрачности воды (в Невской губе прозрачность воды на отдельных станциях не превышала 10 см) и глубины евфотной зоны из-за огромных количеств минеральной взвеси поступивших в толщу воды. В 2007 г. в Невской губе её средняя концентрация достигала 103 г/м<sup>3</sup>. Увеличение концентрации минеральной взвеси в 2006-2007-м гг. привело к повышению концентрации общего фосфора

В 2003 г. наблюдался низкий сток рек в Балтийское море и антициклонический режим погоды в регионе, что стало причиной значительного затока придонных соленых и обедненных кислородом вод из западных глубоководных районов Финского залива во внешнюю и даже во внутреннюю часть эстуария р. Невы летом 2003 г. Этот заток придонных вод явился следствием мощного притока соленых вод из Северного моря в Балтийское (Аверкиев и др., 2004). В результате затока придонных вод из западной части Финского залива концентрация фосфатов в придонном слое воды во внешнем эстуарии увеличилась в 3-5 раз по сравнению с обычным уровнем и достигла 122 мг/м<sup>3</sup> (Еремина, Карлин, 2008). Благодаря этому затоку восточная часть Финского залива получила количество фосфора, превышающее его количество, поступающее со стоком реки Невы за год (Савчук, 2005). Поступивший в процессе затока придонных вод из западной части Финского залива фосфор находился летом 2003 г. в придонном слое воды ниже галоклина, который не перемешивался с менее солеными и теплыми поверхностными водами, поэтому дополнительный фосфор не поступал в евфотный слой воды. Только во время сильных штормов, которые характерны для Финского залива непосредственно перед периодом зимней стагнации, придонный слой мог быть перемешан, в результате дополнительное количество фосфора поступило в толщу воды. По-видимому, это и было причиной массового развития фитопланктона и резкого увеличения первичной продукции в восточной части Финского залива в 2004 г., когда уровень первичной продукции в летние месяцы во внутреннем эстуарии превысил, а во внешнем почти достиг 2 гС/м<sup>2</sup>сут. В последующие после затока годы наблюдалось постепенное понижение её уровня.

Таким образом, проведенные исследования показали, что изменения величин первичной продукции в различных частях эстуария р. Невы тесно связаны со сложной геоморфологической структурой эстуария и динамикой глубинных вод. По величинам первичной продукции его воды в настоящее время относятся к мезотрофно-эвтрофному классу вод. При этом, наибольшие величины скорости фотосинтеза и первичной продукции планктона наблюдаются в средней части эстуария: внутреннем эстуарии. В

этой же зоне наблюдаются наибольшие концентрации взвешенных органических веществ.

## **Глава 7. Влияние геохимических барьеров на первичную продукцию планктона и деструкцию органического вещества на примере эстуария р. Невы и Выборгского залива**

Геоморфологическое строение чаши эстуария р. Невы обуславливает постепенное перемешивание речных и морских вод по мере удаления от устья реки. В настоящий период в эстуарии р. Невы выделяют несколько геохимических барьеров (Рыбалко, Федорова, 2008). Эти барьеры формируют «маргинальный» фильтр эстуария р. Невы. А.П. Лисицин (1988) указывал, что в средней части маргинального фильтра наблюдается увеличение концентрации хлорофилла *a*. Однако в литературе нет однозначного мнения о механизме формирования этого максимума.

В ходе настоящего исследования было показано, что формирование максимума развития фитопланктона в средней части эстуария р. Невы, видимо, связано с особенностями перемешивания речных и морских вод. Так как эстуарий р. Невы относится к эстуариям «положительного» типа, то в нем имеется два разнонаправленных течения. Поверхностное течение направлено от эстуария в сторону моря, в нем речные воды постепенно перемешиваются с морскими. В придонном слое воды формируется компенсационное течение, направленное в сторону устья р. Невы, приносящее более соленые морские воды. В средней части эстуария на краю конуса выноса р. Невы из-за уменьшения глубины по сравнению с более мористыми частями, придонное течение выклинивается к поверхности, где смешивается с речными водами, в результате соленость воды возрастает с 0.06 до 1 ‰. Придонные слои воды богаче биогенными элементами, чем поверхностные воды, в результате при их выклинивании на поверхность возникает зона повышенной продуктивности фитопланктона. В этой зоне эстуария возникает постоянный апвеллинг (рис. 1). Кроме того, благодаря небольшой глубине Невской губы, вода в этой акватории хорошо прогревается, что компенсирует низкую температуру поднимаемых глубинных вод. В результате температура воды в зоне апвеллинга всего на несколько градусов ниже температуры в Невской губе и это понижение температуры не влияет на развитие фитопланктона. Таким образом, массовое развитие фитопланктона в средней части эстуария вызвано, главным образом, постоянным апвеллингом возникающим на границе Невской губы и внутреннего эстуария. В пользу такого механизма формирования зоны повышенной продуктивности фитопланктона в средней части эстуария говорит и то, что в Выборгском заливе, который относится к эстуариям «нейтрального» типа, нами не было обнаружено зон с повышенной продуктивностью фитопланктона. Перемешивание пресных и морских вод в нем идет постепенно, водная толща на большей части акватории не стратифицирована. По мере продвижения речных вод в сторону моря происходит осаждение взвешенных частиц, однако зоны с повышенной

продуктивностью фитопланктона не обнаруживается. В этом заливе первичная продукция планктона равномерно снижается по мере продвижения от верхней части к нижней части залива. В свою очередь, геохимические барьеры, возникающие при изменении скорости течения и солености воды в эстуарии р. Невы, оказывают влияние на поведение мертвых взвешенных (в средней части эстуария, в зоне комплексного геохимического барьера, оседает 95% взвеси поступающей из его верхней части) и растворенных веществ, а также на развитие гетеротрофных микроорганизмов.

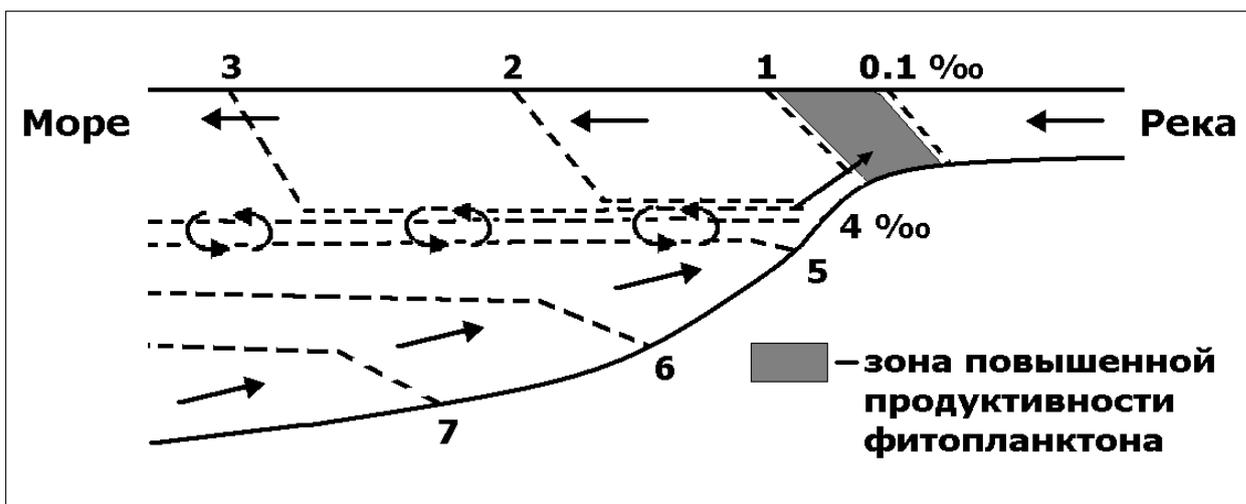


Рисунок 1. Схема формирования зоны повышенной продуктивности фитопланктона в средней части эстуария р. Невы.

Гидродинамический барьер на границе Невской губы и внутреннего эстуария, главным образом, ответственен за оседание крупнодисперсной фракции взвеси во внутреннем эстуарии. Солевые барьеры в эстуарии р. Невы, по-видимому, в большей степени приводят к коагуляции минеральных и органических коллоидов, вызывают флокуляцию растворенного органического вещества и его последующее осаждение. С точки зрения евтрофирования и загрязнения наиболее уязвимой оказывается зона комплексного геохимического барьера. Именно в этой зоне концентрируются все вещества, в том числе биогенные элементы, поступающие из вышележащих частей эстуария, а также из придонного слоя воды. Благоприятные условия для развития фитопланктона здесь складываются и благодаря тому, что замедляется скорость течения, увеличивается прозрачность воды, биогенные элементы поступают не только из вышележащих частей эстуария, но и с поднятием глубинных вод. В результате евтрофирования в этой зоне часто наблюдается «цветение» воды, а у дна, могут формироваться условия гипоксии. Поэтому для оценки последствий евтрофирования в эстуариях важно правильно идентифицировать зону массового развития фитопланктона. Увеличение стока биогенных и загрязняющих веществ с водосбора эстуария будет в первую очередь оказывать отрицательное влияние на зону комплексного геохимического барьера. Особенно сильно зоны геохимических барьеров выражены в «положительных» эстуариях со значительным стоком речных

вод, к которым относится эстуарий р. Невы. В «нейтральных» эстуариях с низким речным стоком, где процессы перемешивания пресных и соленых вод происходят постепенно, и нет подтока обогащенных биогенными элементами придонных вод, как в Выборгском заливе, зона геохимического барьера оказывается менее выраженной.

### **Выводы**

1. На примере мелководных соленых озер Крыма показано, что вдоль градиента солености воды имеется два стабильных гидробиологических режима, в которых доминируют планктонные или донные продуценты. Изменение солености воды приводит к смене этих режимов. Важными элементами перехода от одного гидробиологического режима к другому является степень устойчивости конкретных видов к высокой солености воды и изменения вдоль градиента солености биотических взаимодействий между организмами смежных трофических уровней.
2. Установлено, что в соленых озерах умеренной зоны, не замерзающих из-за высокой солености воды, зимой создается значительная или даже большая часть годовой первичной продукции фитопланктона. При этом величина деструкции органического вещества в зимний период снижается, по сравнению с летним периодом. В результате в гиперсоленых озерах в зимний период создается больше органического вещества, чем разлагается. Это дополнительное органическое вещество частично захоранивается в донных отложениях, а частично используется биотой в течение следующего летнего сезона.
3. Проведенное исследование показало, что экосистемы гиперсоленых озер обладают слабой устойчивостью к воздействию внешних факторов. Выявлено, что из-за упрощенной трофической структуры в мелководных соленых водоемах может наблюдаться быстрая смена основных первичных продуцентов – фитопланктона или фитобентоса. Показано, что изменение солености воды из-за погодных и климатических флуктуаций в разные годы является важным фактором, определяющим смену гидробиологического режима этих водоемов.
4. Выявлено, что смешение пресных и соленых вод и формирование зон геохимических барьеров в эстуарных системах, где происходит флокуляция и интенсивное осаждение органических и минеральных веществ, приводит к закономерному изменению продукционно-деструкционных процессов в водной толще. Увеличение концентрации минеральной взвеси приводит к увеличению концентрации фосфора в водоемах, вне зависимости от концентрации солей.
5. Зоны геохимических барьеров характеризуются повышенной продуктивностью фитопланктона. Установлено, что особенно сильно зоны повышенной биологической продуктивности выражены в «положительных» эстуариях со значительным стоком речных вод и подтоком придонных вод обогащенных биогенными элементами, как в

эстуарии р. Невы. В «нейтральных» эстуариях со слабым речным стоком, как в Выборгском заливе, где процессы перемешивания пресных и соленых вод происходят постепенно, зона геохимического барьера с повышенной продуктивностью фитопланктона оказывается менее выраженной. Показано, что зона геохимического барьера эстуария наиболее подвержена процессу евтрофирования и загрязнению. Увеличение стока биогенных и загрязняющих веществ будет в первую очередь оказывать отрицательное влияние на эту часть эстуария.

**Список работ по теме диссертации в изданиях,  
рекомендованных ВАК:**

1. **Golubkov M.S.**, Golubkov S.M., Umnova L.P. 2004. Primary production, concentration of total phosphorus and concentration of chlorophyll “a” in different parts of Neva Estuary // Труды Зоологического института РАН. (Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci.). Vol. 300. P. 91-98.
2. Boulion V.V., **Golubkov M.S.** 2005. Biological productivity of the saline lakes of Crimea // Труды Зоологического института РАН (Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci.). Vol. 308. P. 13-21.
3. Balushkina E.V., Golubkov S.M., **Golubkov M.S.**, Litvinchuk L.F., Shadrin N.V. 2005. Characteristic features of ecosystems of hyperhaline lakes of the Crimea// Труды Зоологического института РАН (Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci.). Vol. 308. P. 5-13.
4. **Golubkov M.S.**, Sergey M. Golubkov, Yulia I. Gubelit, Larisa F. Litvinchuk. 2006. Primary production and composition of phytoplankton assemblages in hypersaline lakes of the Crimea // Труды Зоологического института РАН. (Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci.). Vol. 310. P. 59-66.
5. Golubkov S., **Golubkov M.**, Balushkina E., Litvinchuk L., Gubelit Y. 2006. Biodiversity-productivity relationships in the ecosystems of salt lakes // Труды Зоологического института РАН (Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci.). Vol. 310. P. 67-75.
6. Golubkov S., Kemp R., **Golubkov M.**, Baluskina E., Litvinchuk L., Gubelit Y. 2007. Biodiversity and the functioning of hypersaline lake ecosystems of Crimea Peninsula (Black Sea) // Fundamental and Applied Limnology (Archiv für Hydrobiologie). Vol. 169/1. P. 79-87.
7. Балускина Е.В., Голубков С.М., **Голубков М.С.**, Литвинчук Л.Ф. 2007. Структурно-функциональные характеристики экосистем малых соленых озер Крыма // Биология внутренних вод. № 2. с. 11-19.
8. **Голубков М.С.** 2009. Первичная продукция планктона в эстуарии р. Невы на рубеже XX-XXI веков // Биология внутренних вод. № 4. С. 20-26.
9. Балускина Е.В., Голубков С.М., **Голубков М.С.**, Литвинчук Л.Ф., Шадрин Н.В. 2009. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем соленых озер Крыма // Журнал общей биологии. Т. 70. № 6. С. 504-514.

**Список основных работ, опубликованных по теме диссертации в  
других изданиях:**

1. **Голубков М.С.** 2007. Роль естественных и антропогенных факторов в изменении трофического статуса эстуария реки Невы // Материалы межд. конф. «Большие морские экосистемы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление)», 10-13 октября 2007, Ростов-на-Дону, Россия. С. 52-59.
2. Голубков С.М., **Голубков М.С.**, Умнова Л.П. 2007. Процессы эвтрофикации вод восточной части Финского залива // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. – Вып.2. Апатиты: Издательство Кольского научного центра РАН. С.580-591
3. **Голубков М.С.**, Голубков С.М., Умнова Л.П. 2008. Первичная продукция и проблемы эвтрофирования эстуария р. Невы // Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. Под ред. Алимова А.Ф, Голубкова С.М. Л.-М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 313-338.
4. **Golubkov M.S.**, Golubkov S.M., Umnova L.P. 2008. Role of sedimentation and resuspension of particulate matter in fluctuations of trophic status of the Neva Estuary\* // Proceedings of US/EU-Baltic 2008 International symposium “Ocean observation, ecosystem-based management and forecasting, 27-29 May 2008, Tallinn, Estonia. Library of congress of USA: № 2008902075, ISBN: 978-1-4244-2268-5, IEEE Catalog Number: CFP08AME-CDR