

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ЗООЛОГИИ НАН БЕЛАРУСИ»

УДК: 574.586

Сысова  
Елена Александровна

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СООБЩЕСТВ  
ФИТОПЕРИФИТОНА В ОЗЕРАХ РАЗНОГО  
ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА**

03.00.18 – гидробиология

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Минск, 2008



сезонной динамике структурной организации сообществ перифитона озерных экосистем» № ГР 20042290 и «Разработка методики для оценки устойчивости озерных экосистем к биологическим инвазиям» № ГР 20063760 при поддержке Фонда Фундаментальных Исследований Республики Беларусь № Б04М-096 и № Б06Р-112 соответственно.

#### **Цель и задачи исследования**

Цель работы – выявить структурную организацию и закономерности пространственной и временной динамики фитоперифитона в озерах разного уровня трофии.

#### **Задачи исследования:**

1. Определить видовой состав и оценить таксономическую структуру водорослевых сообществ перифитона в зависимости от вида макрофита-субстрата, его местоположения в зарослях в озерах разного уровня трофии.
2. Установить различия таксономической структуры водорослевых сообществ перифитона и литорального планктона в озерах разного уровня трофии.
3. Выявить сезонную динамику водорослевых сообществ перифитона и литорального планктона на примере мезотрофного озера.
4. Установить особенности структуры слабо- и прочно-прикрепленного слоя фитоперифитона в озерах разного уровня трофии.
5. Изучить процесс колонизации искусственного субстрата в зависимости от его пространственной ориентации и местоположения в зарослях высшей водной растительности в мезотрофном озере и разработать модель для численного исследования динамики обрастания субстрата водорослями.
6. Установить изменение структуры фитоперифитона в процессе деэвтрофирования на примере мезотрофного оз. Нарочь.

Объект исследования – водорослевые сообщества перифитона.

Предмет исследования – структура и динамика сообществ фитоперифитона.

Выбор объекта обусловлен способностью водорослей быстро реагировать на изменения условий окружающей среды и в то же время способность сообществ фитоперифитона обладать эффектом «долгосрочной памяти», что позволяет по изменению структуры сообществ судить об изменениях условий окружающей среды.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Сообщества фитоперифитона в озерах разного уровня трофии представлены прочноприкрепленным к субстрату слоем водорослей и слабоприкрепленным слоем. Видовое богатство прочно- и слабоприкрепленных слоев сопоставимо. С увеличением трофности озер в обоих слоях возрастает доля типично планктонных видов. Основную долю численности фитоперифитона составляют водоросли прочноприкрепленного слоя.
2. В результате деэвтрофирования мезотрофного озера происходит существенное сокращение видового богатства фитоперифитона, возрастает значимость диатомовых водорослей в сообществах и намечается тенденция снижения биомассы фитоперифитона.
3. Впервые на основании результатов численного эксперимента, проведенного по разработанной модели колонизации субстрата, объяснено образование прямого градиентного обрастания его поверхности. Двухпараметрическая модель размножения адекватно описывает экспоненциальную стадию развития фитоперифитона, а трехпараметрическая – любую стадию сукцессионного процесса.

#### **Личный вклад соискателя**

Материал, положенный в основу диссертации, собран, обработан и проанализирован автором самостоятельно. В ходе работы было отобрано и обработано 600 проб фитоперифитона. Определение видового состава, расчеты численности и биомассы водорослей перифитона проведены автором лично. В основу разработанной модели колонизации субстрата фитоперифитоном положены идеи автора, сформулированные в ходе выполнения полевых исследований, а также результаты проведенных автором экспериментов. Результаты исследований таксономической структуры и динамики фитоперифитона, изложенные в научных статьях, написанных в соавторстве с А.А. Жуковой, Н.Н. Майсак, А.В. Тетеревым, выполнены автором лично.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории водных беспозвоночных и особенно Н.Н. Майсак, а также сотрудникам Учебно-научного центра «Нарочанская биологическая станция имени Г.Г. Винберга» Белгосуниверситета Э. А. Журавлевой и А.Ю. Азаренкову за помощь при сборе материала; директору биологической станции Т.В. Жуковой за помощь при проведении исследований на озерах Нарочь, Мисто и Баторино; З.И. Горельшовой за помощь при первичном определении водорослей; А.В. Тетереву и Н.А. Тетереву за математическую интерпретацию разработанной модели; Н.А. Тетеревой за помощь при создании базы данных «Биотоп». Автор выражает особую благодарность научному руководителю Т.А. Макаревич, за научные консультации и помощь при выполнении работы.

### Апробация результатов диссертации

Материалы диссертации были представлены на Международном симпозиуме «Перифитон континентальных вод: современное состояние изученности и перспективы дальнейших исследований» (Тюмень, 2003), II Международной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» (Минск-Нарочь, 2003), Международных конференциях «Молодежь в науке» (Минск, 2003 – 2007), республиканской научно-практической конференции «Антропогенная динамика ландшафтов и проблемы сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия» (Минск, 2004), IX зоологической научной конференции «Динамика биологического разнообразия фауны, проблемы и перспективы устойчивого использования и охраны животного мира Беларуси» (Минск, 2004), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы изучения фито- и микобиоты» (Минск, 2004), Международной научно-практической конференции «Стратегия развития аквакультуры в условиях XXI» (Минск, 2004), IX съезде Гидробиологического общества РАН (Тольятти, 2006), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2007), X Международной научной конференции диатомологов стран СНГ «Морфология, клеточная биология, экология, флористика и история развития диатомовых водорослей» (Минск, 2007) III Международной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» (Минск-Нарочь, 2007).

### Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований опубликовано 23 работы. Из них 6 научных статей общим объемом 2,1 авторского листа, а также публикации в сборниках трудов и материалах конференций – 12 и тезисах – 5, общим объемом 2,5 авторских листа.

### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 244 стр. машинописного текста и содержит 29 таблиц (общим объемом 13 стр.), 76 рисунков (общим объемом 43 стр.). В приложения вынесены 6 таблиц, общим объемом 52 стр. и акты о внедрении на 3 стр. Библиографический список включает 293 источника, в том числе 23 публикации соискателя.

## ИЗУЧЕННОСТЬ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ФИТОПЕРИФИТОНА

На основании аналитического обзора литературы, касающегося вопросов современного состояния изученности фитоперифитона континентальных вод, установлено, что достаточно хорошо изучены следующие аспекты: влияние факторов среды на развитие фитоперифитона, связь фитоперифитона с фитопланктоном, развитие фитоперифитона на субстратах разного характера и происхождения, структура и динамика формирования фитоперифитона, моделирование динамики фитоперифитона.

В литературе накоплен большой материал, отражающий различные аспекты структурной организации водорослевых сообществ перифитона. Однако до настоящего времени нет четких представлений по целому ряду вопросов. Слабо изученным остается взаимодействие сообществ фитоперифитона и фитопланктона. Недостаточно внимания уделено сравнению структуры прочно- и слабоприкрепленных слоев фитоперифитона. Практически отсутствуют многолетние ряды исследований фитоперифитона в озерах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу диссертации положены материалы, полученные в период с 2001 по 2005 годы. Работа выполнена в Институте зоологии НАН Беларуси. Полевые исследования проведены на базе стационара Института зоологии на оз. Северный Волос в 2001 г., и учебно-научного центра «Нарочанская биологическая станция имени Г.Г. Винберга» Белгосуниверситета с 2002 по 2005 гг.

Исследования были проведены на разнотипных озерах северо-запада Беларуси: Нарочь (мезотрофное), Мястро (слабозотрофное), Баторино (эвтрофное), относящиеся к Нарочанской группе; Северный Волос (мезотрофное) Браславской группы; озеро Обстерно (слабозотрофное) и Нобисто (макрофитное, дистрофное) Обстерновской группы озер.

Исследовали фитоперифитон макрофитов: рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), рдест плавающий (*P. natans* L.), кубышка желтая (*Nuphar luteum* (L.) Smith), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud), камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla), ситняг болотный (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult.), аир обыкновенный (*Acorus calamus* L.).

Образцы фитоперифитона кубышки и рдестов отбирали согласно общепринятой методике (Макаревич, 1995). Для сбора фитоперифитона полупогруженных макрофитов был использован разработанный автором специальный пробоотборник, позволяющий раздельно отбирать прочно- и слабоприкрепленные слои фитоперифитона.

Учет числа водорослей проводили в камере Фукс-Розенталя при помощи микроскопа Micros MC300 при увеличении  $\times 360$ - $\times 1000$ . Численность и биомассу определяли стандартным счетно-объемным методом.

Выполнена серия натуральных экспериментов с использованием экспериментального субстрата (тефлоновая пленка) для изучения процесса колонизации.

Для сравнения альгофлоры перифитона использовали индекс флористического сходства Жаккара, оценку видового разнообразия сообществ проводили при помощи индексов Маргалефа и Шеннона. Обработку данных проводили на ПЭВМ при помощи пакетов программ «Excel» и «Statistica 6.0».

## СТРУКТУРА ФИТОПЕРИФИТОНА

В фитоперифитоне исследованных озер выявлено 289 видов водорослей, принадлежащих к 7 отделам, среди которых два вида, обнаруженных в оз. Нарочь – *Fragilaria arcus* (Ehr.) Cleve (= *Ceratoneis arcus* (Ehr.) Kutzing) (уязвимый вид) и *Gomphocymbella ancylis* (Cleve) Hustedt (вид, находящийся на грани исчезновения) – внесены в Красную книгу Республики Беларусь. Установлено, что видовое богатство альгофлоры перифитона в мезотрофных озерах выше, в сравнении с эвтрофными и дистрофными.

Основу видового богатства фитоперифитона во всех обследованных озерах составляют диатомовые и зеленые водоросли (таблица 1).

Таблица 1 – Таксономическая структура альгофлоры перифитона разнотипных озер

Показатель	Озеро						
	С. Волос	Нарочь	Обстерно	Мястро	Баторино	Нобисто	
Трофность	Мезо-трофное	Мезо-трофное	Слабо-эвтрофное	Слабо-эвтрофное	эвтрофное	дистрофное	
Число видов (В)	185	223	130	140	135	143	
Число родов (Р)	72	86	59	62	62	62	
Отношение В/Р	2,5	2,6	2,2	2,3	2,2	2,3	
Доля (% от общего числа видов)	диатомовые	44	45	48	51	49	42
	зеленые	39	36	38	33	31	40
	синезеленые	11	7	12	9	10	10
другие	6	12	3	7	10	8	

Среди диатомовых семейства Naviculaeae и Fragilariaceae составляют по 12% от общего числа видов, семейство Cymbellaceae – до 8%, среди зеленых сем. Desmidiaceae – до 16%, сем. Hydrodictiaceae – до 7% и сем. Scenedesmaeae – до 6%.

Структура сообществ фитоперифитона зависит от пространственной локализации субстрата. На примере фитоперифитона тростника прослежено изменение видового богатства в зависимости от произрастания тростника в разных участках зарослей (край зарослей со стороны береговой линии и со стороны открытой воды; центр зарослей). Видовое богатство сообщества снижается по направлению к краю зарослей со стороны открытой воды. Численность фитоперифитона в разных участках зарослей зависит от уровня трофии водоема. В мезотрофном оз. Нарочь численность сообщества увеличивается по направлению к краю зарослей со стороны открытой воды. В слабоэвтрофном оз. Мястро численность сообщества в центре зарослей и на краю зарослей в прибрежье практически одинакова и снижается к краю зарослей со стороны открытой воды. В эвтрофном оз. Баторино численность фитоперифитона наибольшая на краю зарослей со стороны прибрежья, а наименьшая – в центре зарослей.

На примере фитоперифитона на листьях рдеста блестящего, расположенных на разном удалении от водной поверхности, показано, что на глубине примерно 30 см численность и биомасса водорослей перифитона выше, чем на верхушечных листьях.

На основании результатов эксперимента, по исследованию начальной стадии колонизации субстрата фитоперифитон, определены различия в формировании сообщества в зависимости от типа литорали (открытая, закрытая литораль). В открытой части литоральной зоны мезотрофного озера С. Волос зеленые водоросли составляют от 50 до 90% биомассы фитоперифитона, образующегося на поверхности экспериментального субстрата. В закрытой части литоральной зоны доминируют диатомовые водоросли, составляя в среднем около 50% от общей биомассы. Численность первооселенцев диатомовых водорослей различается в открытой и закрытой литорали. Так, численность *Gomphonema parvulum* Kütz. в закрытой литорали на 18 сутки эксперимента составляет  $2900 \pm 200$  кл/см<sup>2</sup>, а в открытой – только  $1000 \pm 160$  кл/см<sup>2</sup>, а численность *Cyclotella ocellata* Pant. и *Synedra ulna* (Nitzsch.) Ehr. в открытой литорали более чем в два раза превосходит численность данных видов в закрытой части литорали.

Видовое богатство, состав доминирующего комплекса видов и динамика их численности различаются на горизонтально и вертикально ориентированных поверхностях. Виды диатомовых водорослей *Cocconeis placentula* Ehr. и *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz. входят в состав доминирующего комплекса только на горизонтально ориентированных, а *Cymbella silesiaca* Breisch. in Rabenh. – только на вертикально ориентированных поверхностях.

Сообщества фитоперифитона в озерах разного уровня трофии представлены прочноприкрепленным к субстрату слоем водорослей и

слабоприкрепленным слоем. Видовое богатство слоев фитоперифитона сопоставимо. Во всех озерах в обоих слоях фитоперифитона преобладают виды, приспособленные к существованию как в планктоне, так и в перифитоне. Доля типично планктонных видов водорослей в обоих слоях фитоперифитона увеличивается по мере возрастания уровня трофики водоемов.

Основу численности фитоперифитона составляют водоросли прочноприкрепленного слоя (рисунок 1), среди которых обильно представлены типичные обрастатели. В слабоприкрепленном слое по численности преобладают эвритонные виды.

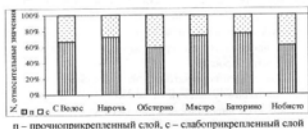


Рисунок 1 – Соотношение численности (% от общей численности) прочно- и слабоприкрепленных слоев фитоперифитона в озерах разного уровня трофики

Диатомовые водоросли доминируют по численности как в прочно, так и в слабоприкрепленном слое фитоперифитона во всех типах озер. Обилие зеленых водорослей и водорослей других отделов выше в слабоприкрепленном слое, чем в прочноприкрепленном.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ВОДОРОСЛЕВЫХ СООБЩЕСТВ ПЕРИФИТОНА И ЛИТОРАЛЬНОГО ПЛАНКТОНА

Анализ структуры сообществ фитоперифитона и литорального фитопланктона на примере мезотрофных озер Нарочь, С. Волоос и эвтрофного оз. Обстерно показал, что по числу видов и численности клеток и в перифитоне, и в планктоне доминируют диатомовые водоросли. В фитоперифитоне всех исследованных озер доля диатомовых от общего числа видов составила 50 %, от общей численности 85 %, а в фитопланктоне 40 % и 55 % соответственно. Среди диатомовых в обоих экологических группировках преобладают виды класса Pennatorphyceae, среди зеленых – класса Protococophyceae. Наиболее

значимые различия в таксономической структуре фитоперифитона и фитопланктона выявлены на видовом уровне.

Численность и биомасса фитопланктона значительно возрастают в ряду озер С. Волоос – Нарочь – Обстерно (0,8 млн. экз./л и 0,45 мг/л в оз. С. Волоос, 0,7 млн. экз./л и 0,6 мг/л в оз. Нарочь и 4,7 млн. экз./л и 2,03 мг/л в оз. Обстерно соответственно). Значения численности и биомассы фитоперифитона в оз. Нарочь в три раза выше, чем в озерах С. Волоос и Обстерно.

В сезонной динамике фитоперифитона и фитопланктона на примере мезотрофного оз. Нарочь прослеживаются тенденции синхронного изменения количественных характеристик (за исключением второй половины июня, когда колебания показателей разнонаправлены) (рисунок 2).

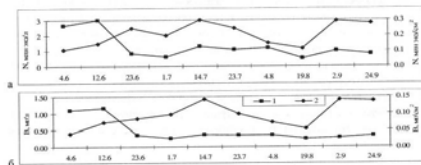


Рисунок 2 – Сезонная динамика численности (а) и биомассы (б) фитопланктона (1) и фитоперифитона (2) в оз. Нарочь в 2003г.

В сезонной динамике отмечены различия в комплексе доминирующих видов в фитопланктоне и фитоперифитоне. Представители диатомовых и золотистых водорослей – *Cyclotella comta* (Ehr.) Kütz. и *Dinobryon sociale* Ehr., соответственно – занимают значительную долю доминирующего комплекса в обоих сообществах в июне, однако к июлю их численность резко падает. *Diatoma anceps* (Ehr.) Kirchn. отмечена в обоих сообществах в июне и июле ( $R = 0,9$ ). Обилие *S. silesiaca* характерно в доминирующих комплексах фитоперифитона и фитопланктона. В то же время, обилие *Achnanthes minutissima* Kütz. в сообществах изменяется в противофазе ( $R = -0,69$ ). Представитель криптофитовых водорослей *Rhodomonas pusilla* (Bachm.) Javor., вид большую часть вегетационного сезона доминирующий в фитопланктоне, в фитоперифитоне встречается в незначительном количестве.

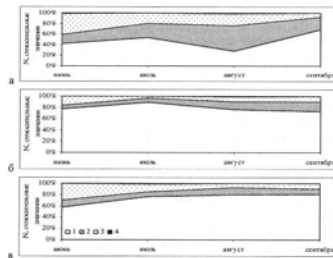
## ДИНАМИКА ФИТОПЕРИФИТОНА

На примере двух биотопов оз. С. Волос (открытая литораль с зарослями воздушно-водных макрофитов, закрытая литораль с преобладанием макрофитов с плавающими листьями) установлены различия начальной стадии сукцессии сообществ фитоперифитона в зависимости от условий среды, в которой находится заселяемый субстрат. В ходе проведения эксперимента по обрастанию тefлоновой ленты фитоперифитоном обнаружено, что в открытой литорали процесс обрастания протекает интенсивнее, чем в закрытой. К 18 суткам эксперимента биомасса фитоперифитона составляла  $42 \pm 3$  мкг/см<sup>2</sup> (приведены средние значения  $\pm$  SD) в открытой литорали и  $26 \pm 14$  мкг/см<sup>2</sup> в закрытой. Выявлены принципиальные различия в динамике разных таксономических групп и видов водорослей. Общей закономерностью, независимо от условий среды, является преобладание среди первопоселенцев видов с широким экологическим спектром. В ходе сукцессии они замещаются типичными обрастателями. В условиях нашего эксперимента резкое увеличение численности видов-обрастателей (*G. parvulum*, *A. minutissima* и *C. silesiaca*) отмечено после 9-х суток с начала эксперимента.

Выявлена специфика сезонной динамики структурной организации фитоперифитона в озерах разного уровня трофии (рисунок 3). Во всех трех озерах исследования проводили в зарослях тростника одинаковой плотности (80 растений на 1 м<sup>2</sup>). В слабозвтрофном оз. Мясро и звтрофном оз. Баторино соотношение диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей изменяется незначительно. В мезотрофном оз. Нарочь с середины июля по август наблюдали существенное снижение относительной численности диатомовых и возрастание относительной численности зеленых водорослей.

В процессе деэвтрофирования оз. Нарочь в структуре фитоперифитона произошли значительные изменения (таблица 2). Сократилось видовое богатство фитоперифитона. Состав доминирующих по видовому богатству родов сохранился неизменным, однако насыщенность их видами в подавляющем большинстве снизилась. Например, род *Navicula* в 1981 г. был представлен 21 видом, а в настоящее время – 10 видами, *Gomphonema* – соответственно 16 и 10, *Symbella* – 16 и 13, *Achnanthes* – 8 и 3, *Ephemia* – 6 и 4, *Cosmarium* – 36 и 12 (Макаревич, 1995, Сысова, 2006). Несколько изменилось соотношение в альгофлоре перифитона диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей в сторону возрастания доли диатомовых от общего числа видов.

Доля диатомовых водорослей в общей численности увеличилась на 15 %. Наблюдается тенденция к снижению биомассы фитоперифитона.



1 – диатомовые, 2 – зеленые, 3 – синезеленые, 4 – представители других отделов

Рисунок 3 – Динамика относительной численности представителей основных отделов водорослей в перифитоне озер Нарочь (а), Мясро (б), и Баторино (в) в 2004 г.

Таблица 2 – Некоторые показатели развития фитоперифитона

Показатель	Годы	
	1981-1986 <sup>(1)</sup>	2002-2005
Число видов	357	212
Доля (%) от общего числа видов водорослей	диатомовые	35
	зеленые	46
	синезеленые	11
Индекс флористического сходства Жаккара <sup>(2)</sup>	38,5 %	59 %
Биомасса, мг/10 см <sup>2</sup> <sup>(3)</sup>	2 $\pm$ 1,3	0,7 $\pm$ 0,3
Доля (%) от общей численности <sup>(4)</sup>	диатомовые	70
	зеленые	8
	синезеленые	16

Примечание 1 – приведены данные Т.А. Макаревич [1995]

2 – приведены средние значения индекса флористического сходства между перифитоном макрофитов раст плавающих, раст блестящих и тростник обыкновенный в соответствующие периоды исследований

3 – приведены средние значения биомассы  $\pm$  SD на основании данных о биомассе перифитона на макрофитах (раст плавающих, раст блестящих и тростник обыкновенный)

4 – приведены значения за 1981 и 2005 годы

## МОДЕЛЬ ОБРАСТАНИЯ СУБСТРАТА ПЕРИФИТОНОМ

Построение модели оседания фитоперифитона на субстрат в водоемах со стоячей водой проведено, исходя из предположения о существовании незначительных течений воды, вызванных внешними возмущающими факторами, главным из которых является ветер. Для учета влияния пограничного слоя построена аппроксимация для расчета продольной и поперечной компонент скорости относительно поверхности субстрата. В модели введено понятие «донорного слоя», представляющего собой объем жидкости, из которого первопоселенцы имеют потенциальную возможность попасть на рассматриваемую поверхность субстрата. Необходимые для расчета траектории данные о местоположении, скорости и т. п. параметрах каждой отдельной особи водоросли, находящейся в «донорном слое», определяются с помощью метода Монте-Карло.

При численном моделировании колонизации субстрата с постоянной концентрацией фитопланктона получена градиентная плотность обрастания субстрата водорослями, отмечаемая в экспериментах других авторов. На верхнем кадре рисунка 4 точками изображены положения осевших на площадку длиной 6 см и шириной 1 мм (пропорции изображения на рисунке не соблюдены) обростателей при направлении потока слева направо. На нижнем кадре дано распределение, полученное при переменном направлении потока то слева, то справа, причем направление выбиралось случайным равновероятным образом. Видно, как с изменением направления потока меняется и градиентное распределение фитоперифитона на поверхности субстрата.

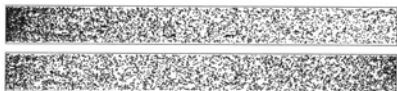
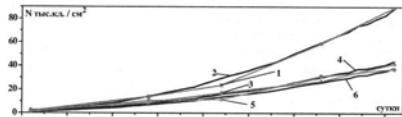


Рисунок 4 – Расчетное заполнение выделенной поверхности субстрата первопоселенцами

Для моделирования поверхностной плотности фитоперифитона на стадии его экспоненциального роста разработана двухпараметрическая модель деления клеток сообщества, в качестве параметров которой используется доля делящихся клеток и время деления. Подбором этих двух параметров удалось получить согласование результатов численного моделирования с данными

эксперимента на начальной стадии обрастания искусственного субстрата, в качестве которого использована тефлоновая пленка. Натурный эксперимент проводился в течение 19 суток на оз. С. Волос в 2001 г. К концу периода экспоненциального роста, когда возникает дефицит хотя бы одного из жизненно важных ресурсов, происходит замедление роста популяции. Используя линейную зависимость параметров размножения от времени, удалось с достаточной точностью описать динамику обрастания тростника обыкновенного на стадии экспоненциального роста представителей диатомовых водорослей, продолжающуюся в течение первых 40 суток эксперимента. Сопоставление результатов численного моделирования с данными эксперимента, проводившегося на оз. Нарочь в 2003 г. для *A. minutissima*, *C. silesiaca* и *G. parvulum* приведено на рисунке 5.



1 – эксперимент *A. minutissima*, 2 – модель *A. minutissima*, 3 – эксперимент *C. silesiaca*, 4 – модель *C. silesiaca*, 5 – эксперимент *G. parvulum*, 6 – модель *G. parvulum*

Рисунок 5 – Сравнение результатов моделирования обрастания тростника с данными натурального эксперимента

На стадии стабильного развития фитоперифитонного сообщества, наступающего после стадии экспоненциального роста, изменение его численности является отражением изменяющихся внешних факторов, способствующих или, наоборот, угнетающих рост популяции. Величиной, определяющей в этом случае численность сообщества, является его равновесная численность, для расчета которой разработан алгоритм, использующий в качестве исходных данных динамику численности фитопланктона. Построенная трехпараметрическая модель, в качестве параметров которой используется доля делящихся клеток, доля гибнущих клеток и период деления, позволяет рассчитывать численность фитоперифитонного сообщества на протяжении всего периода наблюдения.



Разработанная модель способна описывать процесс колонизации в широком диапазоне скоростей течения потока, а различные способы моделирования динамики фитоперифитонного сообщества позволяют проследить за ходом обрастания на протяжении всего вегетационного периода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Видовое богатство альгофлоры перифитона выше в мезотрофных озерах в сравнении с эвтрофными и дистрофным. Основу видового богатства фитоперифитона во всех обследованных озерах составляют диатомовые (42–51% от общего числа видов) и зеленые (31–40%) водоросли. Среди диатомовых семейства Naviculaceae и Fragilariaceae составляют по 12% от общего числа видов, семейства Symbellaceae – до 8%, среди зеленых сем. Desmidiaceae – до 16%, сем. Hydrodictyaceae – до 7% и сем. Scenedesmeaceae – до 6%. [1, 3–7, 10, 11, 14, 16, 17, 21, 22].

2. Видовое богатство сообщества фитоперифитона тростника зависит от локализации макрофита-субстрата в разных участках зарослей: число видов в сообществе снижается к краю зарослей со стороны открытой воды. Численность фитоперифитона в разных участках зарослей зависит от трофности водоема. В мезотрофном оз. Нарочь численность сообщества увеличивается по направлению к краю зарослей со стороны открытой воды. В слабоэвтрофном оз. Мястро численность сообщества в центре зарослей и на краю зарослей в прибрежье практически одинакова и снижается к краю зарослей со стороны открытой воды. В эвтрофном оз. Баторино численность фитоперифитона наибольшая на краю зарослей со стороны прибрежья, а наименьшая – в центре зарослей [5, 7, 10, 11, 13, 14, 22].

3. В озерах разного уровня трофии сообщества фитоперифитона представлены прочноприкрепленным к субстрату слою водорослей и слабоприкрепленным слою. Видовое богатство прочно- и слабоприкрепленных слоев сопоставимо. Как в слабо-, так и в прочноприкрепленном слое фитоперифитона с увеличением трофии возрастает доля типично планктонных видов, независимо от уровня трофии озер 70–80% общей численности фитоперифитона составляют водоросли прочноприкрепленного слоя [3, 7, 9, 16].

4. На примере мезотрофных озер Нарочь и С. Волос и эвтрофного оз. Обстерно показано, что по числу видов и численности и в перифитоне и в планктоне доминируют диатомовые водоросли. В фитоперифитоне всех исследованных озер доля диатомовых от общего числа видов составила 50%, от общей численности – 85%, а в фитопланктоне 40 и 55% соответственно.

Численность и биомасса литорального фитопланктона значительно увеличивается по мере увеличения уровня трофии в ряду озер С. Волос – Нарочь – Обстерно. Значения численности и биомассы фитоперифитона в оз. Нарочь в три раза выше, чем в озерах С. Волос и Обстерно. В сезонной динамике фитоперифитона и литорального планктона мезотрофного оз. Нарочь прослеживаются тенденции синхронного изменения количественных показателей [1, 8, 20].

5. Установлены различия в начальной стадии сукцессии сообщества фитоперифитона в зависимости от условий среды, в которой находится заселяемый субстрат. В открытой части литоральной зоны биомасса фитоперифитона на тефлоновых пленках на 18-е сутки эксперимента составила 42 мкг/см<sup>2</sup>, а в закрытой части литорали – 26 мкг/см<sup>2</sup>. Выявлены различия в динамике разных таксономических групп и видов водорослей. Общей закономерностью, независимо от условий среды, является преобладание среди первооселенцев видов с широким экологическим спектром. В ходе сукцессии они замещаются видами – типичными обростателями [2, 12, 19].

6. Выявлена специфика сезонной динамики структурной организации фитоперифитона в озерах разного трофического статуса. В слабоэвтрофном оз. Мястро и эвтрофном оз. Баторино соотношение диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей изменяется незначительно. В мезотрофном оз. Нарочь с середины июля по август наблюдали существенное снижение относительной численности диатомовых и возрастание относительной численности зеленых водорослей [4, 10, 13].

7. Впервые показано, что в процессе деэвтрофирования оз. Нарочь структурная организация водорослевого сообщества перифитона претерпела значительные изменения: видовое богатство фитоперифитона сократилось на 40%; биомасса сообщества снизилась примерно в два раза; увеличилась доля диатомовых водорослей в общей численности на 15% [1, 4, 10, 11, 16–18].

8. Впервые разработана универсальная имитационная модель обрастания субстрата, основанная на индивидуальном рассмотрении каждого отдельного представителя сообщества фитоперифитона на протяжении всего периода развития. Учет пограничного слоя и введение нового понятия «донорный слой» позволило простым образом объяснить краевой эффект, заключающийся в градиентном распределении плотности фитоперифитона на поверхности субстрата. Все основные параметры разработанной модели являются величинами, которые могут быть получены в экспериментах. Модель предназначена для исследования пространственно-временной динамики фитоперифитона на субстрате любого происхождения [2, 4, 15, 19, 23].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы явились основой для разработки практических рекомендаций – базы данных «Биотоп», позволяющей вносить, хранить и обрабатывать результаты экспериментов по изучению фитоперифитона и фитопланктона; методики раздельного отбора проб слабо- и прочно-прикрепленных слоев фитоперифитона; особенностей структурной организации фитоперифитона в озерах разного трофического статуса, – которые используются в учебном процессе на кафедре общей экологии и методики преподавания биологии для выполнения лабораторных работ «Спешпрактикума», при выполнении курсовых и дипломных работ, при чтении лекционного курса «Первичные продуценты» (имеются акты об использовании в учебном процессе).

Разработанная имитационная модель обростания представляет интерес, прежде всего в плане теоретических исследований в гидробиологии. Ее программная реализация является удобным и гибким инструментом для изучения влияния биотических и абиотических факторов окружающей среды на динамику обростания фитоперифитоном искусственных и естественных субстратов. Так, в диссертационной работе с ее помощью получено наглядное объяснение экспериментально наблюдаемого эффекта прямого градиентного обростания поверхности субстрата и исследованы стадии колонизации и стадии стабильного развития фитоперифитона на различных субстратах.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СЫСОВОЙ Е.А.

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Сысова, Е.А. Структура водорослевых сообществ эпифитона и литорального планктона / Е.А. Сысова // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2. – 2006. – № 1. – С. 48-52.
2. Сысова, Е.А. Структура фитоперифитонных сообществ на начальной стадии обростания и ее связь с типом биотопа / Е.А. Сысова // Вестник Тюменского государственного университета. – 2005. – №5. – С. 116-124.
3. Сысова, Е.А. Таксономическая структура эпифитона в озерах разного типа / Е.А. Сысова // Вестні НАН Беларусі. Сер. біял. Наук. – 2006. – №5. – С. 196-201.
4. Сысова, Е.А. Сезонная динамика структуры водорослевых сообществ эпифитона и литорального планктона / Е.А. Сысова // Вестні Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта. – 2006. – №2. – С. 62-68.
5. Сысова, Е.А. Водоросли и беспозвоночные, ассоциированные с зарослями тростника / Е.А. Сысова, Н.Н. Майсак // Вестник Белорусского фонда фундаментальных исследований. – 2007. – №3. – С. 24-32.
6. Майсак, Н.Н. Видовое богатство водорослей и беспозвоночных (Rotifera, Crustacea) перифитона на макрофитах в озерах разного трофического статуса /

Н.Н. Майсак, Е.А. Сысова // Вестні НАН Беларусі. Сер. біял. Наук. – 2007. – №2. – С. 112-117.

Материалы и сборники конференций:

7. Сысова, Е.А. Структура водорослевой компоненты перифитона на *Potamogeton natans* L. в озерах разного типа // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы II Межд. научн. конф. Минск – Нарочь, 22-29 сент. 2003 / сост. и общ. ред. Т.М. Михеева. – Мн.: БГУ, 2003. – С. 365-369.
8. Сысова, Е.А. Сравнительная характеристика флористического состава перифитона и фитопланктона литорали озер Обстерно и Северный Волос / Е.А. Сысова // Сборник трудов молодых ученых НАН Беларуси. Том II. Отделение аграрных наук. Отделение биологических наук. Отделение медицинских наук, Минск 2003 / Научн. Ред. И.Д. Волоотовский [и др.]. – Мн.: ИОО «Право и экономика», 2003. – С.223-226.
9. Сысова, Е.А. Сравнительный анализ структуры водорослевых сообществ слабо- и прочноприкрепленного слоев перифитона / Е.А. Сысова // Актуальные проблемы изучения фито- и микробыоты: Сб. статей Междунар. научн.-практ. конф., 25-27 окт. 2004, Минск. – Мн. 2004г. С. 265-267.
10. Жуклова, А.А. Структура и продукционные параметры перифитона тростниковых зарослей в озере Нарочь / А.А. Жуклова, Е.А. Сысова // Стратегия развития аквакультуры в условиях XXI: Мат. междунар. научн.-практ. конф., 23-27 авг. 2004, Минск. – Мн. «Тонтик»2004. – С.177-180.
11. Майсак, Н.Н. Фито и зоокомпонента перифитона рдеста блестящего (*Potamogeton lucens* L.) / Н.Н. Майсак, Е.А. Сысова // Актуальные проблемы изучения фито- и микробыоты: Сб. статей Междунар. научн.-практ. конф., 25-27 окт. 2004, Минск. – Мн. 2004г.
12. Сысова, Е.А. Влияние биотопа и ориентации субстрата на динамику начальной стадии роста перифитона // Сборник трудов молодых ученых Национальной Академии Наук Беларуси. Том I / Научн. Ред. В.Г. Гусаков [и др.] – Мн.: ИП Логвинов, 2004. – С.259-263.
13. Сысова, Е.А. Сопреженность динамики водорослей и колловраток в зарослях *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD / Е.А. Сысова, Н.Н. Майсак // Колловратки (таксономия, биология и экология): Тезисы и материалы IV Междунар. конф. по колловраткам. Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова. Борок, 6-8 дек. 2005 / Редкол. А.В. Крылов [и др.] – Борок 2005. – С. 308-319.
14. Сысова, Е.А. Структура водорослевой компоненты перифитона в зависимости от расположения субстрата / Е.А. Сысова // Антропогенная динамика ландшафтов и проблемы сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия: Мат. II респ. научн.-практ. конф., Минск, 1-2 дек. 2004. / Отв. ред. И.Э. Бученков, А.В. Хандогий. – Мн.: БГТУ, 2004. – С. 83-84.
15. Сысова, Е.А. Численное моделирование обростания субстрата фитоперифитоном / Е.А. Сысова // Материалы XIV международной конференции

студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» Москва, 2007 / Отв. ред. И.А. Алешковской, А.И. Андреев. – Т.1. – М: СП «Мысль», 2007. – С. 107.

16. Сысова, Е.А. Структура диатомовых водорослей в слоях перифитона в озерах разного трофического статуса / Е.А. Сысова // Морфология, клеточная биология, экология, фазистика и история развития диатомовых водорослей: Мат.Х Междунар. научн. конф. диатомологов стран СНГ, 9-14 сентября 2007 г. Минск. – Мн: БГПУ, 2007. – С.144-146.

17. Сысова, Е.А. Таксономическая структура фитоперифитона озер разного типа / Е.А. Сысова // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Мат. III. Междунар. науч. конф. 17-22 сентября 2007, Минск-Нарочь / сост. и общ. ред. Т.М. Михеева. – Мн.: БГУ, 2007. – С. 184-185.

18. Макаревич, Т.А. Структура перифитона озера Нарочь на разных этапах эволюции его трофического статуса / Т.А. Макаревич, Е.А. Сысова, А.А. Жукон // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Мат. III. Междунар. науч. конф. 17-22 сентября 2007, Минск-Нарочь / сост. и общ. ред. Т.М. Михеева. – Мн.: БГУ, 2007. – С. 62-63.

#### Тезисы:

19. Сысова, Е.А. Структура фитоперифитонных сообществ озера Северный Волос (Беларусь) и ее связь с типом биотопа / Е.А. Сысова // Перифитон континентальных вод: современное состояние изучения и перспективы дальнейших исследований. Материалы докладов Междунар. симпозиума, Тюмень, 3-5 февраля 2003г./ Редкол. А.А. Протасов, А.В. Толстиков. Тюмень: ООО «Опцион ТМ-Холдинг», 2003. – С. 58-59.

20. Сысова, Е.А. Таксономическая структура сообщества фитопланктона и эпифитона разных видов макрофитов / Е.А. Сысова // Динамика биологического разнообразия фауны, проблемы и перспективы устойчивого использования и охраны животного мира Беларуси: Тез. докл. IX зоол. научн. конф. Минск 2004 г. – Мн.: ООО «Мэдвик Бук», 2004. – С. 212-213.

21. Сысова, Е.А. Структурная организация фито- и зооперифитона в зарослях макрофитов озер разного трофического статуса / Е.А. Сысова, Н.Н. Майсак // IX съезд Гидробиологического общества РАН. Тезисы докладов, том II, Тольятти, 18-22 сентября 2006 г. / Редкол. М.Е. Виноградов [и др.]. – Тольятти: ИЭВВ РАН, 2006. – С. 178.

22. Майсак, Н. Н. Сезонная динамика видового богатства и численности водорослей и беззвероночных ассоциированных с *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD / Н.Н. Майсак, Е.А. Сысова // IX съезд Гидробиологического общества РАН. Тезисы докладов, том II, Тольятти, 18-22 сентября 2006 г. / Редкол. М.Е. Виноградов [и др.]. – Тольятти: ИЭВВ РАН, 2006. – С. 6.

23. Сысова, Е.А. Полуэмпирическая модель обрастания субстрата перифитоном на начальной стадии колонизации в водоемах озерного типа / Е.А. Сысова, А.В. Тетерев // IX съезд Гидробиологического общества РАН. Тезисы докладов, том II, Тольятти, 18-22 сентября 2006 г. / Редкол. М.Е. Виноградов [и др.]. – Тольятти: ИЭВВ РАН, 2006. – С. 179.

## РЕЗЮМЕ

Сысова Елена Александровна

### Структура и динамика сообществ фитоперифитона в озерах разного трофического статуса

**Ключевые слова:** фитоперифитон, фитопланктон, слабоприкрепленный слой фитоперифитона, прочноприкрепленный слой фитоперифитона, макрофит-субстрат, уровень трофии водоема, имитационная модель.

**Объект исследования** – водорослевые сообщества перифитона.

**Цель работы** - выявить структурную организацию и закономерности пространственной и временной динамики фитоперифитона в озерах разного уровня трофии.

Методы исследования: общепринятые в гидробиологической практике методы отбора фитоперифитона макрофитов, а также сконструированный протоотборник для отбора проб фитоперифитона воздушно-водных макрофитов.

Впервые оценено соотношение прочно- и слабоприкрепленного слоев фитоперифитона в градиенте трофичности озер. Показано, что независимо от уровня трофии в количественном отношении преобладает прочноприкрепленный слой. Прослежено увеличение доли типично планктонных видов как в слабо так и в прочноприкрепленных слоях фитоперифитона по мере увеличения трофичности.

Впервые на примере оз. Нарочь показано, что в результате деэтрофирования происходит существенное сокращение видового богатства фитоперифитона; возрастает значимость диатомовых водорослей в сообществах; намечается тенденция к снижению биомассы фитоперифитона.

Впервые на основе имитационного моделирования доказано, что образование прямого градиентного обрастания на поверхности субстрата возникает за счет течения в пограничном слое. Разработанная двухпараметрическая модель размножения адекватно описывает экспоненциальную стадию развития фитоперифитона, а трехпараметрическая применима на протяжении любой стадии сукцессионного процесса.

Полученные практические разработки используются в учебном процессе при выполнении лабораторных работ «Спецпрактикума», курсовых и дипломных работ, при чтении лекционного курса «Первичные продуценты».

Разработанная имитационная модель обрастания представляет интерес в плане теоретических исследований в гидробиологии.

**Область применения:** гидробиология, экология, охрана природы

## РЭЗЮМЭ

Сысава Алена Аляксандраўна

### Структура і дынаміка супольнасцей фітаперыфітону ў азерах рознага трафічнага статусу

**Ключавыя словы:** фітаперыфітон, фіталланктон, слабапрымацаваны слой фітаперыфітону, моцнапрымацаваны слой фітаперыфітону, расліна-субстрат, узровень трафіі вадаёму, імітацыйная мадэль.

**Аб'ект даследавання** – водарасцiвая супольнасць перыфітону.

**Мэта** – выявіць структурную арганізацыю і заканамернасці праставай і часовай дынаміцы фітаперыфітону ў азерах рознага Узроўню трафіі.

**Метады даследавання:** выкарыстаны агульнапрынятыя ў гідрабіялагічнай практыцы метады збору фітаперыфітону, а таксама прабадборнік для збору перыфітону з паветрана-водных раслін.

Упершыню ацнены суадносіны моцна- і слабапрымацаваных слаёў фітаперыфітону ў градыенте трафіі азёраў. Незалежна ад узроўню трафіі, у колькасных адносінах пераважае моцнапрымацаваны слой. Доля тыпова планктонных відаў у слаях фітаперыфітону павялічваецца з ростам трафіі.

Упершыню на прыкладзе воз. Нарач паказана, што ў працэсе дэўтрафававання скарачаецца відовае багацце фітаперыфітону; павялічваецца доля дыятомавых водарасцяў у супольнасцях, зніжаецца біямаца фітаперыфітону.

Упершыню на аснове імітацыйнага мадэлявання даказана прамае градыентнае абрастанне на паверхні субстрату. Распрацаваная двухпараметрычная мадэль адекватна апісвае экспаненцыяльную стадыю развіцця фітаперыфітону, а трохпараметрычная прымяняльна на працягу любой стадыі сукцэсійнага працэсу.

Атрыманая практычная распрацоўка выкарыстоўваецца ў вучэбным працэсе пры выкананні лабараторных работ «Спецпрактыкума», курсавых і дыпломных работ, пры чытанні лекцый курса «Першасныя прадукцынты».

Распрацаваная імітацыйная мадэль абрастання прадстаўляе інтарсэ ў плане тэарытычных даследаванняў у гідрабіялогіі.

**Вобласць прымянення:** гідрабіялогія, экалогія, ахова прыроды

## SUMMARY

Sysova Elena

### Structure and dynamics of phytoplankton communities in the lakes of different trophic state

**Key words:** phytoplankton, phytoplankton, loosely attached phytoplankton layer, adnate phytoplankton layer, macrophyte - substratum, trophic state of a reservoir

**Objects of the research** were algal assemblages of periphyton.

**The goal of the study** was to estimate the basic parameters of structural organization and patterns of spatial and temporal dynamics of phytoplankton in the lakes of different trophic level.

Phytoplankton sampling was conducted using standard in hydrobiological practice procedures. The original sampler was used in the study of phytoplankton from emerged macrophytes.

For the first time the ratio between firmly and loosely attached phytoplankton layers in the lakes of different trophic level has been estimated. Irrespectively of the lake's trophic level the adnate phytoplankton layer prevails in the quantitative aspect. The share of typically planktonic species grows both in the loosely and in the firmly attached phytoplankton layers with the increase of the trophic level.

For the first time on the example of Lake Naroch it has been shown, that the de-eutrophication process in the lake caused the essential reduction in the phytoplankton species richness; the diatom algae share in the communities has grown; the level of phytoplankton biomass has decreased.

For the first time on the basis of imitation modeling it has been proved, that the formation of the direct gradient of the fouling on a substratum surface is due to the current in a boundary layer. The developed two-parametrical model of algal cells reduplication adequately describes an exponential stage of phytoplankton development, and three-parametrical model can be used during any stage of the succession process.

The received practical developments are used in the educational process during the laboratory studies, course and degree works, while reading the lecture course «Primary producers».

The developed imitation model of fouling is of big interest for theoretical research in hydrobiology.

**Field of application:** hydrobiology, ecology, environmental management

