

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

УДК [574.635+628.356.63]:[592+593.175]

ТРИФОНОВ
Олег Викторович

**ПЕРИФИТОН ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

03.00.18 – гидробиология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Минск – 2003

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Быстрый рост городов, строительство крупных промышленных предприятий приводят к резкому увеличению объемов сточных вод и пополнению их состава новыми, в большинстве случаев токсичными веществами. Станции биологической очистки сточных вод не справляются с возрастающими нагрузками, что приводит к снижению качества очистки воды, а значит – к загрязнению естественных водоемов и ухудшению экологической обстановки в Республике.

Однако потенциальные возможности биологических методов в очистке воды еще далеко не исчерпаны. Для их дальнейшего совершенствования необходима более полная информация обо всех структурных и функциональных элементах экосистемы очистных сооружений. Перифитон в этом отношении представляет собой самую малоизученную экологическую группу организмов. Тем не менее, известно, что в естественных водоемах ему принадлежит важная роль в процессах самоочищения и трансформации загрязняющих веществ. Изучение видового состава, динамики развития, экологии и особенностей функционирования перифитонного сообщества очистных сооружений будет способствовать совершенствованию технологии очистки сточных вод и тем самым поможет решить проблемы, связанные с охраной окружающей среды.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Материалы, представленные в диссертации, получены при выполнении научно-исследовательской работы по теме «Экология и особенности функционирования биоты очистных сооружений в связи с проблемой биологической очистки сточных вод» (БРФФИ, 2001–2003 гг., № 20012682).

Цель работы: установить структурную организацию, основные закономерности формирования и функционирования перифитона очистных сооружений на примере Минской очистной станции азрации (МОСА).

Задачи исследования:

1. Определить видовой состав и динамику формирования перифитонного сообщества;
2. Оценить уровни количественного развития перифитона на искусственных субстратах;
3. Оценить роль перифитона в очистке сточных вод.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – сообщество перифитона водосборного канала вторичных отстойников Минской очистной станции азрации (УП «Минскводо-

Работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии биологического факультета Белорусского государственного университета (БГУ)

Научный руководитель – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий НИЛ гидроэкологии БГУ
А. П. Остапеня

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор заведующая сектором Института зоологии НАН Беларуси
Г. А. Галковская

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и охраны природы Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины
И. Ф. Рассашко

Оппонирующая организация – Санкт-Петербургский государственный педагогический университет им. А. Н. Герцена

Защита состоится 27 мая 2003 г. в 14⁰⁰ на заседании Совета Д 01.32.01 при Институте зоологии НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27. Тел.: (017) 284-21-91, факс: 284-10-36, e-mail: lakes@bsu.by

С диссертацией можно ознакомиться в Совете при Институте зоологии НАН Беларуси

Автореферат разослан «___» апреля 2003 г.

Ученый секретарь Совета кандидат биологических наук

Н. Н. Рощина

канал», г. Минск, Беларусь). *Предмет исследования* – таксономическая структура, динамика формирования, рост, функциональные показатели перифитона (потребление бактерий и растворенного кислорода).

Методы проведенного исследования

При выполнении работы использовали стандартные методы гидробиологических исследований. Для изучения видовой структуры, динамики численности и массы перифитона применяли метод экспериментальных субстратов. Количественный учет организмов производили методом прямого счета организмов под микроскопом. Массу перифитона определяли гравиметрически; численность бактерий в сточной воде – методом элифлуоресцентной микроскопии; концентрацию кислорода – электрохимическим методом; ХПК – методом бихроматного окисления.

Научная новизна работы

Данная работа является первым для Республики Беларусь и стран СНГ специальным исследованием перифитона, развивающегося в водосборных каналах вторичных отстойников станции биологической очистки сточных вод. В результате выполненной работы впервые установлена таксономическая структура перифитона, изучена динамика его формирования и роста на искусственных субстратах. Получены данные об интенсивности потребления бактерий и растворенного кислорода перифитонным сообществом в целом. Оценена роль перифитона в очистке воды от бактериального загрязнения и минерализации органического вещества. Разработана оригинальная установка для экспонирования экспериментальных (искусственных) субстратов в условиях очистных сооружений, а также установка для изучения функциональных показателей перифитона. Обоснована перспективность использования перифитона в системе доочистки сточных вод от бактериального загрязнения.

Практическая значимость полученных результатов

Представленные материалы исследований дополняют информацию о видовой структуре, экологии, морфологии биоты очистных сооружений и могут быть использованы в учебном процессе в курсе лекций по экологии и санитарной гидробиологии. Данные о динамике видового состава и численности организмов перифитонного сообщества необходимы для оценки качества очистки сточной воды и контроля технологического режима работы станции. Результаты исследования могут использоваться при создании банка данных по фауне беспозвоночных водоемов Республики Беларусь. Данные о количественном развитии перифитона и его роли в очистке воды являются основой для разработки технологии доочистки городских сточных вод методом биофильтрации.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– Таксономическая структурная перифитона, развивающегося в сооружениях биологической очистки сточных вод, является специфичной, характерной только для данного типа искусственных экосистем. Специфичность заключается в подавляющем доминировании в сообществах колониальных кругоресничных инфузур, которые в отсутствие хищного зоопланктона в системах, достигают чрезвычайно высоких биомасс, нехарактерных для естественных экосистем.

– Структурно-функциональная организация перифитона, обеспечивает высокую интенсивность минерализации органического вещества и потребления бактерий, что позволяет рассматривать перифитон как перспективный блок в системе доочистки сточных вод от остаточного загрязнения.

Личный вклад соискателя

Материалы, положенные в основу диссертации собраны, обработаны и проанализированы автором самостоятельно. Данные о физико-химическом составе очищенной воды предоставлены соискателю химико-бактериологической лабораторией МОСА.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертации были представлены на VIII зоологической научной конференции «Структурно-функциональное состояние биологического разнообразия животного мира Беларуси» (Минск, 1999); Международной научной конференции «Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды» (Минск–Нарочь, 1999); XIV Коми республиканской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2000); Отчетной конференции аспирантов биологического фак-та БГУ (Минск, 2001); XII Международной конференции молодых ученых «Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия» (Борок, 2002); II Международной научно-практической конференции «Достижения современной биологии и биологического образования» (Минск, 2002).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 работ общим объемом 25 страниц. Из них 2 статьи в рецензируемых журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов и материалах конференций и 3 тезисов докладов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации – 100 страниц, из них 27 страниц занимают 26 иллюстраций и 5 таблиц. Список использованных источников включает 156 названий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологическая схема Минской очистной станции аэрации

Минская очистная станция аэрации осуществляет очистку бытовых и производственных сточных вод города и окрестных населенных пунктов. На сегодняшний день станция принимает около 750 000 м³/сутки сточных вод, из которых 40% – производственных и 60% – бытовых. Сточная вода проходит 2 этапа очистки: механическую и биологическую.

В процессе механической очистки из стоков последовательно изымаются крупные отходы, песок и взвешенные органические вещества. Крупные примеси удаляются путем процеживания через решетки, песок осаждается в горизонтальных аэрируемых песколовках, а взвешенные органические вещества, жиры и нефтепродукты – в вертикальных отстойниках.

Биологическая очистка осуществляется в аэротенках с помощью активного ила. Аэротенки работают в режиме вытеснителей с регенерацией активного ила. Очищенную воду отделяют от активного ила путем отстаивания во вторичных отстойниках и по системе водосборных (водоотводных) каналов направляют на выпуск в р. Свислочь (бассейн р. Березина).

Образующийся на станции осадок (песок, органические вещества, избыточный активный ил) обезвоживают и вывозят на захоронение.

Физико-химический состав очищенной сточной воды характеризуется следующими показателями (средние за 2000–2001 гг., \pm SD, n=24): pH–7,50 \pm 0,07; взвешенные вещества–18,4 \pm 2,1 мг/л; БПК₅ (неотстоенная проба)–11,5 \pm 1,4 мг O₂/л; ХПК (неотстоенная проба)–60,0 \pm 10,4 мг O₂/л; сухой остаток–430 \pm 47 мг/л; нефтепродукты–0,35 \pm 0,12 мг/л; СПАВ–0,23 \pm 0,07 мг/л; железо–0,31 \pm 0,12 мг/л; хром–0,037 \pm 0,012 мг/л; медь–0,03 \pm 0,007 мг/л; цинк–0,05 \pm 0,02 мг/л; никель–0,020 \pm 0,005 мг/л.

Температурный режим: 18–19 $^{\circ}$ C в зимний период, 22,0–24,5 $^{\circ}$ C – в летний.

Программа и методы исследования

Материал для изучения видового состава и количественного развития организмов перифитонного сообщества собирали круглогодично в течение 2000–2002 гг. В качестве субстратов для перифитона использовали стеклянные пластины и пластмассовые ленты, которые погружали в воду водосборного канала вторичных отстойников (очищенную воду) вертикально на расстоянии 1,5–3,0 см от ее поверхности. Стеклянные пластины применялись для изучения начальных этапов формирования биообрастания (от 0,5

до 12 суток). Перифитон в возрасте от 14 до 54 суток изучали на пластмассовых лентах.

В целях предотвращения засорения перифитона крупными отходами и получения равномерного обрастания, стекла экранировали прозрачным цилиндрическим стаканом (Раилкин, 1998). При экранировании пластмассовых лент экранирование не применяли.

Количественный учет организмов перифитона в начальный период его формирования производили непосредственно на экспериментальном субстрате. В дальнейшем, когда плотность обрастания становилась слишком высокой, структуру перифитона изучали на отдельных фрагментах, аккуратно снятых с поверхности субстрата. Параллельно отбирали пробы воды из аэротенков для изучения видового состава и количественного развития беспозвоночных активного ила.

Всего за период исследования собрано и обработано свыше 900 образцов перифитона.

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА ПЕРИФИТОНА НА ИСКУССТВЕННЫХ СУБСТРАТАХ

В составе перифитона очистных сооружений были обнаружены все крупные таксоны гидробионтов перифитона естественных водоемов: бактерии, грибы, водоросли, простейшие и многоклеточные беспозвоночные. Однако основной группой организмов-обрастателей были *простейшие*, главным образом, колониальные кругоресничные инфузории (подкласс Peritrichia). За сравнительно короткие сроки их рассветительные формы закреплялись практически на всех видах твердых субстратов, погружаемых в воду. На протяжении всего изучаемого периода развития перифитона Peritrichia занимали лидирующее положение, формируя на субстрате сложную пространственную структуру. Другие группы обрастателей были представлены в значительной меньшей степени, хотя являлись постоянными членами биоценоза.

Развитие *водорослей* в очистных сооружениях ограничивалось высокой мутностью воды. В условиях выполненных экспериментов, водоросли были одной из малочисленных групп обрастателей.

Основная масса *бактериального населения* перифитона была сосредоточена в хлопьях активного ила, который попадал в обрастание из аэротенков и оседал на стеблях кругоресничных инфузур. Поскольку ил стоит, главным образом, из живых бактерий, то увеличение его количества происходило не только за счет пассивного осаждения хлопьев, но и за счет естественного прироста ила в самом обрастании.

Многоклеточные беспозвоночные, являющиеся одним из главных компонентов перифитона естественных биотопов, в чистых сооружениях были представлены слабо. Среди них преобладали коловратки – микрофаги и малоцетинковые черви – детритофаги. Однако их количество и биомасса по сравнению с простейшими была также незначительной.

Рост перифитона после оседания расселительных форм обростателей в изучаемом периоде времени при экспозиции от 1 до 54 суток описывался экспоненциальной зависимостью. В среднем за весь период исследования (20 месяцев) рост общей массы перифитона в начальный период его развития (от 1–2 до 7 ± 3 суток) аппроксимировался уравнением ($R^2 = 0,9$; $n = 20$):

$$\text{Lg } W = (0,4501 \pm 0,1158) t - (0,3815 \pm 0,5052), \quad (1)$$

где W – масса перифитона, г сухого вещества/100 см², t – экспозиция, сутки.

При экспозиции от 14 до 54 суток экспоненциальное увеличение массы происходило с гораздо меньшей скоростью: угловой коэффициент равнялся 0,0186. А само уравнение роста имело вид ($R^2 = 0,8$; $n = 3$):

$$\text{Lg } W = (0,0186 \pm 0,0039) t - (0,3047 \pm 0,1316) \quad (2)$$

Таким образом, четкого перехода кривой роста перифитона в стационарную фазу зафиксировано не было. Подобное явление характерно для всех сообществ, где доминирующая группа обростателей представлена колониальными формами, т. к. благодаря их сложному строению, с большой долей инертной биомассы (в виде домиков, стеблей и пр.) наблюдается увеличение площади поверхности субстрата (Раилкин, 1998). Это приводит к тому, что на субстрате формируется сложная многоярусная структура сообщества, и количественные закономерности роста перифитона усложняются: на новом ярусе увеличение биомассы сначала идет по экспоненте, тогда как на предшествующем ему ярусе уже может наступить стационарная фаза или даже фаза торможения роста.

Масса перифитона в водосборном канале за счет доминирования колониальных организмов достигала такой величины как 440 г сухого вещества на 1 м² (рис. 1).

Следует отметить, что увеличение массы перифитона происходило как за счет естественного размножения и роста перифитонных организмов, так и за счет аккумуляции на его поверхности хлопьев активного ила азотенков и, в меньшей степени, микро- и макроорганизмов.

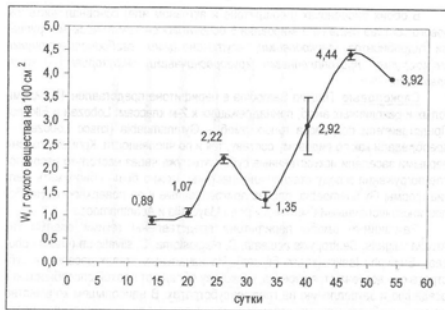


Рис. 1. Рост перифитона на пластмассовых лентах

ВИДОВОЙ СОСТАВ И ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИФИТОННОГО СООБЩЕСТВА

Как уже было отмечено выше, основная роль в формировании перифитона водосборного канала вторичных отстойников принадлежит одноклеточным и, отчасти, многоклеточным беспозвоночным. Всего в составе сообщества обнаружено 80 видов беспозвоночных: из них 57 – Protozoa и 23 – Metazoa. На начальном этапе роста перифитона видовое разнообразие закономерно увеличивалось. Однако, в последующем, когда кривая роста общей массы перифитона переходила в экспоненциальную фазу, количество видов в сообществе уменьшалось. В целом же фаунистический состав перифитона был достаточно стабилен на протяжении всего периода исследования.

В фауне активного ила азотенков, которая изучалась параллельно с перифитоном, было обнаружено 70 видов беспозвоночных (51 – Protozoa и 19 – Metazoa). Все они в той или иной степени были представлены в перифитонном сообществе водосборного канала вторичных отстойников.

В обоих биоценозах (перифитоне и активном иле) основная часть видового состава была сформирована 5 основными систематическими группами гидробионтов: саркодовыми, жгутиконосцами, свободноплавающими инфузориями, прикрепленными (кругоресничными) инфузориями и коллатками.

Саркодовые. Подтип Sarcodina в перифитоне представлен 12 видами голых и раковинных амёб, принадлежащих к 2-м классам: Lobozea и Filozea. Представители подкласса голых амёб – Gymnamoebia (класс Lobozea) – преобладали как по видовому составу, так и по численности. Кроме того, они первыми заселяли искусственные субстраты: уже через несколько часов после погружения в воду стеклянной пластины, можно было обнаружить мелкие формы Gymnamoebia, плотно прикрепленные к ее поверхности. Наиболее многочисленными были виды рода Mayorella и Acanthamoeba.

Раковинные амёбы перифитона представлены такими видами как Arcella vulgaris, Centropyxis aculeata, C. plagiostoma, C. silvaticum (класс Lobozea), Euglypha laevis (класс Filozea). На начальных этапах заселения субстрата они встречаются изредка, поскольку обладают плохой способностью к оседанию и закреплению на гладких субстратах. В наибольшем количестве их можно обнаружить на стадиях ускоренного и экспоненциального роста общей массы перифитона.

Характеризуя количественное развитие Sarcodina в целом, следует отметить, что хотя они и являлись первопоселенцами, в последующем постепенно вытеснялись из сообщества: если в первые сутки их доля составляла 30–55% от общей численности беспозвоночных, то к 7–12 суткам снижалась до 1–8,5% (рис. 2). В активном иле азотенков саркодовые являлись доминирующей группой гидробионтов. В среднем за период исследования их доля составила 42,1% от общей численности беспозвоночных данного биоценоза (рис. 3).

Жгутиконосцы. В составе перифитона обнаружено 8 видов жгутиконосцев, принадлежащих к двум классам: Phytomastigophorea и Zoomastigophorea. В основном это мелкие свободноплавающие, ползающие или временно прикрепленные формы (*Anisonema acinus*, *A. ovale*, *Petalomonas pusilla*, *Petanema trichophorum*, *Vodo* sp. и др.). Иногда обнаруживались небольшие колонии прикрепленного жгутиконосца *Vicosca petiolata*.

Как и мелкие саркодовые, жгутиконосцы преобладали только на начальных стадиях формирования перифитона. В первые сутки их доля в биоценозе составляла 10–20% от общей численности беспозвоночных, а к 7–12 суткам уменьшалась до 0,1–3,0% (рис. 2).

В активном иле Mastigophora присутствовали постоянно и являлись од-

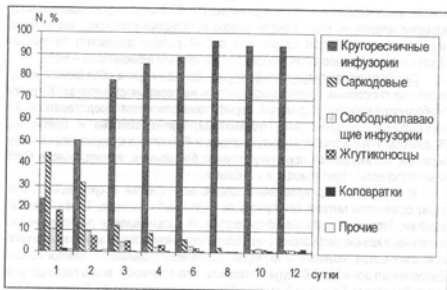


Рис. 2. Соотношение численности (N, %) основных систематических групп беспозвоночных перифитона в январе–феврале 2000 г.

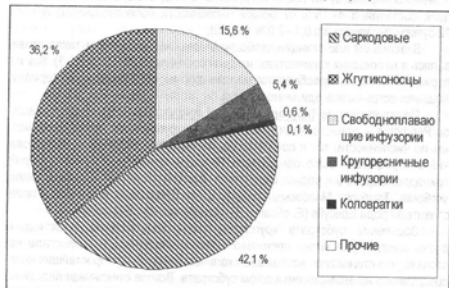


Рис. 3. Соотношение численности (%) основных систематических групп беспозвоночных активного ила (среднее за 2000–2001 гг.)

ной из многочисленных групп организмов – 36,2%. В отдельные периоды времени некоторые виды давали массовые вспышки развития. Численность жгутиконосцев при этом возрастала в 2–4 раза и достигала 18 тыс/мл (8 млн/г сухого вещества активного ила), а их доля в биоценозе – 60%.

Свободноплавающие инфузории. Данная группа объединяет инфузорию, не способных прочно закрепляться на твердых субстратах. К группе свободноплавающих инфузурий перифитона относятся представители 4-х подклассов: *Gymnostomatia*, *Hypostomatia*, *Hymenostomatia* и *Spirotrichia*. Подклассы *Hypostomatia*, *Hymenostomatia* и *Spirotrichia* представлены инфузуриями, питающимися преимущественно бактериями, а в подклассе *Gymnostomatia* есть и бактериофаги и хищники.

В процессе формирования сообщества первыми искусственный субстрат осваивали мелкие бактериофаги *Chilodonella uncinata*, *Trachelophyllum pusillum*, *Trochilia minuta*, *Aspidisca costata*. В дальнейшем в перифитоне появлялись хищные инфузории рода *Litonotus* и *Hemiophrys*, и, в незначительном количестве, крупные инфузории (*Paramecium caudatum*, *Stentor roeselii*, *Spirostomum* sp. и др.). Следует отметить, что в течение всего периода развития биоценоза бактериофаги преобладали над хищниками. В целом группа свободноплавающих инфузурий в составе сообщества была немногочисленной. В первые сутки после погружения в воду стеклянной пластинки ее доля составляла 4–15% от общей численности беспозвоночных, а к 7–12 суткам снижалась до 0,1–2,0% (рис. 2).

В активном иле станции свободноплавающие инфузории также развивались в небольших количествах: их доля составляла 15,6% (рис. 3). Как и в перифитоне, здесь преобладали мелкие формы, питающиеся бактериями. Хищники встречались единично.

Прикрепленные (кругоресничные) инфузории. Инфузории подкласса *Peritrichia* – единственная доминирующая группа организмов биоценоза как по численности, так и по биомассе. За период проведенных исследований в перифитоне было обнаружено 16 видов кругоресничных инфузурий, принадлежащих к 6-и родам: *Carchesium*, *Epistylis*, *Zoothamnium*, *Opercularia*, *Vorticella*, *Thuricola*. Массовыми видами были *Carchesium polypinum* и представители рода *Epistylis* (*E. plicatilis*, *E. plicatilis* var. sp., *E. polenic*).

Заселение субстрата кругоресничными инфузуриями происходило очень быстро: уже через несколько суток их численность возрастала настолько, что становился невозможен количественный учет простейших непосредственно на экспериментальном субстрате. Вскоре стеклянная пластинка полностью покрывалась толстым слоем густых зарослей *Peritrichia* (численность зооидов в колонии у колониальных форм достигала нескольких сотен,

а сами колонии невозможно было выделить из обрастания). При этом постепенно снижалось количество беспозвоночных других систематических групп. Доля *Peritrichia* (по количеству зооидов) в зрелом (7–12 сутокном) сообществе достигала 85–98% от общей численности беспозвоночных (рис. 2).

В активном иле станции, напротив, данная группа инфузурий была одной из самых малочисленных – 5,4% (рис. 3). Среди причин, объясняющих такое резкое различие в количественном развитии *Peritrichia* в двух биотопах, следует отметить три наиболее важные:

1. **Гидродинамический режим и характер субстрата.** Практически все *Peritrichia*, обнаруженные в чистых сооружениях, в природных водоемах ведут прикрепленный образ жизни и обитают, как правило, на неподвижных и малоподвижных субстратах, предпочитая места со слабым течением воды. В азотенках происходит постоянное интенсивное перемешивание воды, которое, вероятно, оказывает отрицательное воздействие на развитие кругоресничных инфузурий в активном иле. В водосборном канале вторичных отстойников вода движется относительно спокойно. Благодаря этому, *Peritrichia* находится в условиях сходных с естественными биотопами.

2. **Физико-химический состав среды.** Бытовые и производственные сточные воды, поступающие в азотенки, содержат различные химические соединения, многие из которых оказывают токсичное воздействие на беспозвоночных, в том числе и *Peritrichia*. В перифитоне водосборного канала данная группа инфузурий подвержена значительно меньшему воздействию неблагоприятных факторов среды, поскольку развивается в воде уже очищенной от вредных примесей.

3. **Кислородный режим.** В системе «азотенка–отстойник» биота активного ила постоянно испытывает на себе значительные колебания содержания растворенного кислорода. В азотенках, благодаря непрерывной аэрации, содержится достаточно кислорода для жизнедеятельности простейших (2–4 мг O_2 /л), однако, во вторичных отстойниках при отстаивании ила его количество может падать до нуля, что создает неблагоприятные условия для развития *Peritrichia*. В водосборном канале, где устанавливали экспериментальные субстраты, концентрация кислорода не опускается ниже 2 мг O_2 /л в зимнее время и 1 мг O_2 /л – в летнее.

Коловратки. Представители типа *Rotifera* являются обязательным компонентом фауны перифитонного сообщества, как естественных водоемов, так и чистых сооружений. В обрастании искусственных субстратов было обнаружено 16 видов коловраток. Наиболее многочисленными были представители отряда *Bdelloidea* и семейства *Proalidae*. Будучи активными бактериофагами, они успешно сосуществуют с колониальными инфузурия-

ми, используя их длинные стебли в качестве субстрата для прикрепления. По мере увеличения толщины перифитона, коловратки, как правило, перемещались к периферическим слоям.

В активном иле азотенков не было обнаружено только два вида перифитонных коловраток: *Proales sigmoidea* и *P. decipiens*. Чаще всего в этом биоценозе встречались представители отряда *Bdelloidea*, виды рода *Cephalodella*, *Lecane*, *Lepadella*.

Как в активном иле, так и в перифитоне коловратки развивались в небольших количествах: в зрелом перифитонном сообществе их доля составляла 0,5–3,5%, а в активном иле – 0,6% от общей численности беспозвоночных данных биоценозов (рис. 2–3).

Кроме вышеупомянутых групп организмов в перифитоне развивались сосущие инфузории, нематоды, малощетинковые черви, брюхохресничные черви и тихоходки. Однако их численность на протяжении всего периода наблюдений была незначительной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПЕРИФИТОНОМ БАКТЕРИЙ И РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА

Как свидетельствуют литературные данные, беспозвоночные очистных сооружений способны эффективно очищать воду от бактериального загрязнения. Наиболее высокие скорости потребления бактерий отмечены у кругоресничных инфузорий. Установлено, что в благоприятных условиях одна особь *Vorticella convallaria* потребляет около 23 тыс. бактериальных клеток в час, а доминирующий вид исследуемого перифитона – *Carchesium polyplum* – до 25 тыс. кл./особь в час (Шубернский, 1984).

В проведенных нами экспериментах была определена величина потребления бактерий беспозвоночными перифитонного сообщества в целом, а также интенсивность дыхания гидробионтов перифитона, как главный показатель их роли в процессе трансформации вещества и энергии. Эксперименты выполнены в лабораторных условиях на перифитоне 3–4 суточного возраста. В качестве субстрата обростания использовали предметные стекла 76×26 мм. Воду для эксперимента отбирали из канала в том месте, где были установлены субстраты, фильтровали через бумажный фильтр «желтая лента» (для удаления остаточного активного ила и других взвешенных частиц) и насыщали кислородом воздуха. Установка, в которой проводили эксперимент, представляла собой прямоугольную, герметично закрывающуюся камеру, в боковых стенках которой были сделаны углубления для фиксации стекла с обростанием. Воду в камеру подавали с помощью насоса.

Величину потребления кислорода и бактерий определяли по разности их содержания на входе и на выходе из системы.

Всего было проведено 4 серии экспериментов. В каждой серии ставили от 1 до 3 опытов, с тем расчетом, чтобы их общая продолжительность не превышала 1,5–2 часов. За это время изменение численности бактерий в исходной воде (таблица) и прирост массы перифитона в камере были незначительными и в расчет не принимались. Скорости протока воды в камере выбирали таким образом, чтобы разность между содержанием бактерий и кислорода на входе и выходе из системы достоверно определялась использованными нами методами. Температуру, при которой ставили опыты, поддерживали на уровне температуры воды в канале в момент отбора проб.

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице.

Потребление перифитоном бактерий и растворенного кислорода

№ серии	Время водообмена, мин	Интенсивность поглощения кислорода, мг O ₂ ·мин ⁻¹ ·г ⁻¹ сухого вещества перифитона	Интенсивность поглощения бактерий, млн кл.·мин ⁻¹ ·г ⁻¹ сухого вещества перифитона
1	15,7	–	1101,6**
	10,5	0,284 (0,250)*	1224,8
	7,3	0,284 (0,250)	1141,9
Исходные данные: T–21,3°C; ХПК–48,4 мг O ₂ /л; масса перифитона–225,50 мг; содержание бактерий–9,68±0,27 млн/мл			
2	16,8	0,358 (0,284)	1712,0
	10,5	0,353 (0,280)	1332,0
	6,2	0,355 (0,282)	1082,0
Исходные данные: T–22,5°C; ХПК–47,8 мг O ₂ /л; масса перифитона–292,05 мг; содержание бактерий–27,35±0,83 млн/мл			
3	50,2	0,354 (0,279)	1127,0
Исходные данные: T–22,6°C; ХПК–53,3 мг O ₂ /л; масса перифитона–18,10 мг; содержание бактерий–10,90±0,34 млн/мл			
4	28,0	0,350 (0,276)	1212,3
	15,8	0,356 (0,280)	1811,6
Исходные данные: T–22,6°C; ХПК–49,4 мг O ₂ /л; масса перифитона–161,35 мг; содержание бактерий–11,74±0,33 млн/мл			

Примечания: * Интенсивность дыхания при 20°C;

** Масса 1 млрд бактерий – 78,45×10⁻³ мг сухого вещества.

1. **Потребление бактерий.** Анализ полученных данных показывает, что интенсивность поглощения перифитомом бактерий практически не зависит от исходного их содержания в воде: в серии № 2, где концентрация бактерий составила 27,35 млн/мл и в серии № 1, где этот показатель равнялся 9,68 млн/мл, интенсивность потребления в пересчете на сухое вещество перифитона была приблизительно одинаковой. Не наблюдалось связи интенсивности потребления бактерий с величиной биомассы перифитона. В серии № 3 масса перифитона была почти в 16 раз меньше, чем в серии № 2, однако, интенсивность потребления бактерий была практически одинаковой.

Наибольшее влияние на питание беспозвоночных оказала скорость потока. Увеличение времени пребывания воды в камере увеличивало и степень ее очистки от бактерий, однако при очень малой проточности отмечено торможение интенсивности потребления микроорганизмов, что наблюдалось в опытах серий № 1 и 4. Во всех экспериментах средняя интенсивность потребления бактерий в расчете на 1 г сухого вещества перифитона составила 1305 ± 271 млн кл. в минуту.

2. **Потребление кислорода.** На величину газообмена гидробионтов оказывала влияние только температура воды: при $21,3^\circ\text{C}$ интенсивность потребления кислорода составила $0,284 \text{ мг } \text{O}_2/\text{г}$ в минуту (серия № 1), а при $22,5-22,6^\circ\text{C} - 0,354 \text{ мг } \text{O}_2/\text{г}$ в минуту (серии № 2-4). При расчете на 20°C (с использованием «нормальной кривой» Крога), интенсивность поглощения кислорода составила $0,273 \pm 0,014 \text{ мг } \text{O}_2/\text{г}$ в минуту.

Поскольку состав перифитона очистных сооружений складывался главным образом из колониальных кругоресничных инфузорий, то именно их можно считать основными потребителями кислорода. Такое допущение дало возможность сравнить интенсивность дыхания сообщества *Peritrichia*, полученную в наших экспериментах, с данными Ф. П. Чорика (1978), приведенными для этой же группы инфузорий. Если предположить, что вся масса перифитона состоит из зооидов *Peritrichia*, и в ней полностью отсутствует инертная составляющая, то получаем, что 1 мг инфузорий биоценоза (при 20°C) потребляет $1,638 \times 10^{-3} \text{ мг } \text{O}_2/\text{ч}$. В экспериментах Ф. П. Чорика (1978), величина газообмена этих же видов инфузорий составила $5,86 \times 10^{-3} \text{ мг } \text{O}_2 \times \text{ч}^{-1} \times \text{мг}^{-1}$, что выше всего в 3,5 раза. По литературным данным, показатели интенсивности дыхания одних и тех же видов инфузорий могут иметь более существенные отличия. Например, Р. Сароджини и Р. Нагабушанам (Sarojini, Nagabhushanam, 1966) отмечают, что одна особь *Spirostomum ambiguum* потребляет $0,192 \times 10^{-3} \text{ мг } \text{O}_2/\text{ч}$, в то время как по данным Т. В. Хлебович (1974), при той же температуре эта инфузория потребляет $12,7 \times 10^{-3} \text{ мг } \text{O}_2/\text{ч}$, т. е.

показатели отличаются более чем в 65 раз. Вероятно, это связано не только с методическими погрешностями, но и экологическими условиями, в которых находились простейшие и их физиологическим состоянием во время проведения опытов (Чорик, 1978).

У колониальных *Peritrichia* (Чорик, 1978), с увеличением числа зооидов в колонии интенсивность газообмена, в перерасчете на одну особь, уменьшается. Однако мы не получили какой-либо зависимости интенсивности дыхания от величины массы перифитона, хотя уровни биомассы в различных сериях экспериментов, как уже было отмечено выше, отличались друг от друга довольно значительно.

Используя величину потребления кислорода и бактерий, а также массу перифитона, полученные в наших экспериментах, можно оценить роль перифитона в доочистке воды от бактериального загрязнения и минерализации органического вещества. Поскольку 1 м^2 субстрата удерживает 440 г перифитона (по сухому веществу), то за сутки в воде, прошедшей биологическую очистку, дополнительно потребляется около 800×10^{12} клеток (63 г сухого вещества) бактерий на 1 м^2 , и минерализуется около 52 г/м^2 углерода, что является достаточно высокой величиной.

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРИФИТОНА В СИСТЕМЕ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Сточные воды, прошедшие биологическую очистку в азотенках, как правило, содержат остаточное количество органических веществ, СПАВ, биогенных элементов (азота и фосфора), солей тяжелых металлов, нефтепродуктов, бактериального загрязнения и пр. Концентрации этих веществ невелики и с учетом разбавляющей способности водоемов-приемников и их очистительной способности не должны наносить существенного вреда окружающей среде. Однако массовые сбросы таких вод могут привести к эвтрофикации и последующему загрязнению водоемов.

В связи с этим, в целях предотвращения негативного влияния на водоем химических соединений сточных вод на очистных сооружениях в ряде случаев осуществляется третичная очистка (доочистка), которая, дополняя традиционную схему двухступенчатой очистки (механическую и биологическую в азотенках), позволяет получить воду требуемого качества. Один из самых распространенных методов доочистки городских сточных вод — биологическая фильтрация. Данный метод основан на способности организмов перифитона изымать из воды практически все виды остаточного загрязнения (как химического, так и бактериального). Доочистка осуществляется в специ-

альных сооружениях – биофильтрах, представляющих собой железобетонные резервуары, заполненные загрузочным материалом, на поверхности которого формируется перифитонная пленка. В качестве загрузки биофильтров, как правило, используют щебень, гравий, перфорированные керамические трубки, пластмассовые ленты и др.

В последнее время широкое распространение получил такой вид загрузочного материала, как «синтетические водоросли» («ерши»), представляющие собой гибкие пушистые гирлянды из лески, вплетенной в витой проволоочный сердечник. Суммарная площадь адгезии таких «ершей», диаметром 120 мм составляет 3–5 м²/м, а удерживаемая биомасса превышает 100 г/м (по сухому веществу).

Нами была рассчитана теоретическая возможность применения синтетических водорослей для доочистки сточной воды МОСА от бактериального загрязнения. Численность бактерий в воде, прошедшей биологическую очистку в аэротенках станции, составляет примерно 15 млн/мл. Если принять, что перифитон в расчете на 1 г сухого вещества потребляет около 1305 млн клеток бактерий в минуту (исходя из средней величины поглощения бактерий, полученной в проведенных нами экспериментах), то для полной очистки от бактерий 670 тыс м³ сточной воды, которая за сутки проходит биологическую очистку, потребовалось бы около 54000 м синтетических водорослей вышеуказанного диаметра. При блочной укладке загрузочного материала объемом, необходимом для размещения такого количества синтетических водорослей, не превышает 1000 м³, что составляет всего лишь 5% объема одного аэротенка.

Поскольку перифитон, кроме бактериального загрязнения, способен эффективно очищать воду от органических веществ и аккумулировать тяжелые металлы, то его использование в системе доочистки сточной воды МОСА позволит значительно уменьшить антропогенную нагрузку на водоем-приемник и улучшить санитарно-эпидемиологическое состояние водных ресурсов Республики Беларусь.

1. В условиях водосборного канала вторичных отстойников перифитон является мощным функциональным блоком трансформации органического вещества.

Основная группа организмов перифитона представлена гетеротрофными одноклеточными и многоклеточными беспозвоночными. Всего в перифитоне обнаружено 80 видов беспозвоночных, из них 12 видов саркодовых, 8 – жгутиконосцев, 16 – свободноплавающих инфузорий, 16 – кругоресничных инфузорий, 16 – колероваток. 70 видов беспозвоночных перифитона, входящих в состав биоценоза активного ила аэротенков [6, 7, 8].

2. В процессе формирования перифитонного сообщества колониальные кругоресничные инфузории (подкласс *Peritrichia*) занимают лидирующее положение, вытесняя беспозвоночных других систематических групп. В зрелом биоценозе (7–12 суток), доля *Peritrichia* составляет 85–98% от общей численности беспозвоночных. Массовыми видами являются *Carchesium polyinum*, *Epistylis plicatilis*, *Epistylis plicatilis* var. sp., *E. polenici* [3, 6, 7, 8].

3. Рост общей массы перифитона на искусственных субстратах при экспозиции от 1 до 54 суток описывается экспоненциальной зависимостью. Максимальная масса перифитона, полученная на искусственных субстратах, составляет 440 г сухого вещества на 1м² [1].

4. На основании экспериментальных данных показано, что организмы перифитонного сообщества способны эффективно очищать воду от бактериального загрязнения: средняя скорость потребления бактерий составляет 1305 млн кл./мин в расчете на 1 г сухого вещества перифитона. Ее величина зависит от времени водообмена и практически не зависит от уровня биомассы перифитона [2].

5. Перифитон в расчете на 1 г сухого вещества потребляет в среднем 0,273 мг O₂ в минуту при 20 °С. Интенсивность поглощения кислорода зависит от температуры воды и практически не зависит от величины биомассы перифитона [5].

6. Высокая скорость роста организмов перифитонного сообщества и способность быстро очищать воду от бактерий позволяет рассматривать перифитон как перспективный объект в системе доочистки сточной воды от бактериального загрязнения. Такая доочистка может производиться в специальных бассейнах или каналах с невысокой скоростью течения воды, путем установки в них субстрата с высоко развитой поверхностью [4].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Трифонов О. В., Остапеня А. П. Рост перифитона на искусственных субстратах во вторичных отстойниках станции биологической очистки сточных вод // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 2. – С. 83–85.
2. Трифонов О. В., Остапеня А. П. Скорость потребления бактерий перифитомом вторичных отстойников станции биологической очистки сточных вод // Вест. Беларус. ун-та. Сер. 2, Химия, биология, география. – 2003. – № 1. – С. 102–104.
3. Трифонов О. В. *Carchesium polyinum* L. в высококачественных водах // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы Междунар. науч. конф., Минск–Нарочь, 20–25 сент. 1999 г. / БГУ. Биол. ф-т. НИЛ гидроэкологии; Сост. и общ. ред. Т. М. Михеева. – Минск, 2000. – С. 458–462.
4. Трифонов О. В. Возможные способы использования перифитона в системе доочистки сточных вод от бактериального загрязнения // Здоровье и окружающая среда: Сб. науч. тр. / НИИ санитарии и гигиены; Под ред. С. М. Соколова, В. Г. Цыганкова. – Минск, 2002. – Т. 2. – С. 358–360.
5. Трифонов О. В., Остапеня А. П. Скорость потребления кислорода перифитомом вторичных отстойников станции биологической очистки сточных вод // Достижения современной биологии и биологическое образование: Тр. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 29–30 нояб. 2002 г. / БГУ. Биол. ф-т. – Минск, 2002. – С. 142–145.
6. Трифонов О. В. Фауна очистных сооружений биологической очистки сточных вод // Структурно-функциональное состояние биологического разнообразия животного мира Беларуси: Тез. докл. VIII зоол. науч. конф. / НАН Беларуси. Ин-т зоологии. – Минск, 1999. – С. 265–267.
7. Трифонов О. В. Фауна беспозвоночных Минской очистной станции азрации // XIV Коми республиканская молодежная научная конференция. Актуальные проблемы биологии и экологии: Тез. докл. VII Молодежной науч. конф., Сыктывкар, 18–20 апр. 2000 г. / РАН. Уральское отд-ние. – Сыктывкар, 2000. – Т. 2. – С. 231–232.
8. Трифонов О. В. Развитие перифитона во вторичных отстойниках сооружений биологической очистки сточных вод // Биология внутренних вод: проблема экологии и биоразнообразия: Тез. докл. XII Междунар. конф. молодых ученых, Борок, 23–26 сент. 2002 г. / РАН. Ин-т биологии внутр. вод – Борок, 2002. – С. 192–193.

РЕЗЮМЕ

Трифонов О. В. Перифитон очистных сооружений биологической очистки сточных вод

Ключевые слова: перифитон, беспозвоночные, инфузории, потребление кислорода, потребление бактерий, рост, сточные воды, очистка, биологический способ, активный ил.

Исследован перифитон водосборного канала вторичных отстойников Минской очистной станции азрации. Цель исследования – установить структурную организацию, основные закономерности формирования и функционирования перифитона очистных сооружений, оценить его роль в процессе очистки сточных вод от бактериального загрязнения. Использованы стандартные методы гидробиологических исследований (метод экспериментальных субстратов, прижизненное микроскопирование и др.). В составе перифитонного сообщества обнаружено 80 видов беспозвоночных, из них 12 видов саркодовых, 8 – жгутиконосцев, 32 – инфузур, 16 – коловраток. Доминировали (по численности) колониальные кругоресничные инфузории – подкласс *Peritrichia*: *Carchesium polyinum*, *Epistylis plicatilis*, *E. polenicii*. Пост общей массы перифитона в изучаемом периоде времени (от 1 до 54 суток) описывался экспоненциальной зависимостью. Максимальная масса, полученная на искусственных субстратах, составила 440 г/м² (по сухому веществу). Показано, что перифитон играет важную роль в очистке воды от бактериального загрязнения. Интенсивность потребления перифитомом бактерий в расчете на 1 г сухого вещества в среднем составила 1305 млн клеток в минуту, а интенсивность потребления кислорода (при 20 °С) – 0,273 мл O₂/мин.

Работа представляет интерес для гидробиологов и экологов, организаций и ведомств, связанных с охраной природы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологии биологической очистки (доочистки) сточных вод.

ABSTRACT

Trifonov O. V. Periphyton of the waste treatment plants of biological purification of sewage

Key words: periphyton, invertebrates, ciliates, oxygen consumption, bacteria consumption, growth, sewage, purification, biological method, activated sludge.

The periphyton of the water canal (catch drain) of the secondary settling tanks of Minsk purification station has been analyzed. The goal of this research was to give characteristic of structural organization, to study the functional indices of the periphyton of waste treatment plants and to evaluate its role in the sewage purification process from bacterial pollution. The standard methods of hydrobiological researches have been used (method of experimental substrates, native microscopy, and others). The 80 species of invertebrates were discovered in periphyton, among them 12 species of Sarcodina, 8 – Mastigophora, 32 – Ciliophora, 16 – Rotifera. Colonial Peritrichia: *Carchesium polypinum*, *Epistylis plicatilis*, *E. polenici* were prevailed in abundance. The growth of the total mass of periphyton during analyzed period of time (from 1 to 54 days) was described by exponential dependence. The highest mass received on the base of artificial substrates was equal to 440 g/m² of dry substance. It was shown that periphyton plays an important role in the process of water purification from bacterial pollution. The intensity of bacteria consumption by periphyton per 1 g of dry substance was equal in average to 1305 mln cells per minute, the intensity of oxygen consumption (by 20 °C) – 0,273 ml O₂/min.

The work may be of great interest for hydrobiologists and ecologists, nature protection departments and organizations. The results received can be used when developing and improving technologies of biological purification of sewage.