



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водных биоресурсов, аквакультуры и гидрохимии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
бакалавра


На тему: «Влияние серобактерий на экологическое состояние пресноводных водоемов»

Направление подготовки 35.03.08 Водные биоресусы и аквакультура,  
профиль «Управление водными биоресурсами и аквакультура»

Исполнитель Бойков Алексей Андреевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат педагогических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Костецкая Галина Анатольевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой   
(подпись)  
кандидат технических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Королькова Светлана Витальевна  
(фамилия, имя, отчество)

« 22 » июня 2023 г.

Санкт–Петербург  
2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1. ПРЕСНОВОДНЫЙ ВОДОЕМ КАК ЭКОСИСТЕМА .....	5
1.1 Комплексная характеристика пресноводных водоемов.....	6
1.1.1 Виды пресноводных водоемов.....	7
1.1.2 Физико-химические особенности .....	8
1.1.3 Гидробиологическая характеристика .....	9
1.2 Микробиота пресноводных водоемов.....	10
1.2.1 Состав микробиоты .....	11
1.2.2 Функции микроорганизмов .....	12
Выводы по главе 1 .....	13
Глава 2. СЕРОБАКТЕРИИ В ЭКОСИСТЕМЕ ПРЕСНОВОДНОГО ВОДОЕМА .....	15
2.1 Серобактерии как компонент микробиоты пресноводного водоема ..	18
2.1.1 Систематика и морфология .....	19
2.1.2 Физиология, особенности метаболизма .....	23
2.1.3 Среда обитания .....	26
2.2 Роль серобактерий в экосистеме пресноводного водоема.....	27
2.3 Влияние деятельности серобактерий на некоторые показатели экологического состояния пресноводного водоема.....	32
Выводы по главе 2 .....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	38

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность исследования.* Внутренние водные экосистемы, которые являются пресноводными, представляют собой системы огромной важности – они являются источником пищи и воды, регулируют климат, поддерживают биоразнообразие и почву, накапливают и устраняют загрязняющие вещества и участвуют в процессе рециркуляции питательных веществ.

Серобактерии играют важную роль в биосфере, являясь одним из основных компонентов биогеохимического цикла серы. Серобактерии – важный компонент водных экосистем, в том числе пресноводных, так как они участвуют в минерализации органических веществ и обогащении воды кислородом. Чрезмерное размножение серобактерий может привести к негативным последствиям, таким как затруднение доступа кислорода для других организмов, формирования кислотных условий и повышение концентрации сероводорода, что может привести к гибели рыб и других водных организмов. Изучение комплексного влияния серобактерий на экологическое состояние пресноводных водоемов позволит более точно отслеживать качественные показатели воды, в том числе и в целях аквакультуры.

*Объект исследования* – экологическое состояние пресноводных водоемов.

*Предмет исследования* – влияние серобактерий на экологическое состояние пресноводных водоемов.

*Цель исследования* — изучить влияние серобактерий на экологическое состояние пресноводных водоемов.

Для решения поставленной цели необходимо осуществить следующие задачи:

1. Дать комплексную характеристику пресноводных водоемов;

2. Изучить микробиоту пресноводных водоемов;
3. Рассмотреть серобактерии как компонент микробиоты пресноводного водоема;
4. Выявить функции серобактерий в экосистеме пресноводного водоема;
5. Изучить влияние деятельности серобактерий на некоторые показатели экологического состояния пресноводного водоема.

Общий объём работы составляет 40 страниц. Работа включает в себя введение, основную часть, представленную двумя главами, выводы к этим главам, заключение, список использованной литературы. Основной текст работы содержит 2 рисунка. Список литературы составляет 31 наименование.

## Глава 1. ПРЕСНОВОДНЫЙ ВОДОЕМ КАК ЭКОСИСТЕМА

Пресноводный водоем – это водная экосистема, где содержание солей и минералов, растворенных в воде низкое. К ним относятся озера, пруды, реки, ручьи, источники, болота и водно-болотные угодья. Они играют важную роль в окружающей среде, так как являются источниками воды для живых организмов.

Пресноводные места обитания можно классифицировать по различным факторам, включая температуру, проникновение света, питательные вещества и растительность. Существует три основных типа пресноводных экосистем [2]:

- лотические – где в качестве примеров пресноводных экосистем, можно привести экосистемы с проточной водой родники, ручьи, реки;
- линзовидные системы – пресноводные водные экосистемы со стоячей водой, такие как лагуны и озера, пруды, болота, топи;
- водно-болотные угодья и эстуарии.

В пресном водоеме можно найти множество видов живых существ, таких как рыбы, насекомые, водные растения и микроорганизмы. Они зависят друг от друга и от баланса водной экосистемы.

В пресном водоеме происходит круговорот питательных веществ, где живые организмы превращают питательные вещества в биомассу, которую потом расщепляют микроорганизмы. Это процесс значительно влияет на качество воды в водоеме и обеспечивает жизнь многих видов.

Кроме того, пресные водоемы участвуют в переработке углекислого газа из атмосферы, поглощая его и освобождая кислород. Это делает пресные водоемы важными для регулирования климата Земли.

Однако пресные водоемы становятся уязвимыми и могут подвергаться разрушению из-за многих факторов, таких как загрязнение, изменение

водоносных характеристик и высыхание [8]. Эти проблемы могут привести к серьезным нарушениям водной экосистемы и угрожать жизни тех, кто зависит от этой экосистемы.

### 1.1 Комплексная характеристика пресноводных водоемов

Пресноводные водоемы – это водные объекты, содержащие пресную воду и находящиеся на земной поверхности или в недрах [1]. Комплексная характеристика пресных водоемов включает анализ таких параметров, как:

Гидрологические характеристики – объем, площадь, форма, глубина, скорость течения, сток и другие параметры, которые характеризуют водный режим водоема.

Физико-химические характеристики – температура воды, рН, содержание кислорода, солей, органических и неорганических веществ, которые определяют качество воды.

Биологические характеристики – видовой состав и численность растительной и животной фауны, которые определяют экосистему водоема.

Инженерно-технические характеристики – использование водоема для водоснабжения, рыбохозяйственного комплекса, энергетики, туризма и других целей, а также наличие амбарных насосных станций, зданий и сооружений.

Экологические характеристики – наличие загрязнений в водном объекте, их источников и степени, а также оценка водоема по экологической безопасности и потенциалу использования.

В целом, комплексная характеристика пресных водоемов позволяет оценить состояние водообъекта, наличие рисков, связанных с его использованием, и принимать меры по улучшению экологической безопасности и восстановлению экосистемы водоема [12].

Среди общих характеристик пресноводных экосистем выделяют следующие:

1. Низкая плотность соли в водах пресноводных экосистем;
2. Биотоп пресноводной экосистемы.

Среди характеристик биотопа или района, в котором находятся эти водные пространства, можно в основном указать на климат в пресноводных экосистемах и расположение пресноводных экосистем.

Климат в пресноводных экосистемах сильно варьируется, поскольку зависит от того, насколько близко или далеко объект находится от прибрежных районов, а также его высота относительно уровня моря. Таким образом, чем выше расположена экосистема, например, на вершине горы, тем холоднее будет климат.

Расположение пресноводной экосистемы является одной из основных характеристик. Это районы континентальных вод, то есть они находятся на суше, либо на поверхности земли, либо под ней.

#### 1.1.1 Виды пресноводных водоемов

1. Озёра – компонент гидросферы, представляющий собой естественно возникший водоём, заполненный в пределах линзы (озёрного ложа) водой и не имеющий непосредственного соединения с морем (океаном).

2. Реки – природный водный поток (водоток) с естественным течением по руслу от истока вниз до устья.

3. Ручьи и потоки – подземный или надземный водный поток.

4. Болота и заболоченные территории – избыточно влажная поверхность земли с большим количеством торфа.

5. Водохранилища (например, пруды и водохранилища на искусственных водотоках и каналах) – это рукотворный водоём для накопления и хранения воды для нужд человека.

6. Источники и родники – вода из подземных вод которая нашла выход на поверхность естественным или искусственным путем.

7. Родниковые пруды – вода из подземных источников образующая водную линзу.

8. Водопады – низвержение рек и в редком случае озер с большой высоты.

9. Водоёмы на территории парков и садов – облагороженные человеком источники водные акватории.

### 1.1.2 Физико-химические особенности

Пресноводные водоемы – это водоемы, содержащие пресную (не соленую) воду. Они могут иметь различные химические и физические свойства, зависящие от таких факторов, как климат, географическое положение, геологическая структура, геоморфология и интенсивность антропогенной деятельности.

1. pH-значение: пресные водоемы имеют обычно слабощелочное или слабокислотное pH-значение, которое варьирует от 6,5 до 8,5. Это связано с наличием в воде карбонатных соединений [22].

2. Ионный состав: ионный состав пресных водоемов зависит от местности и источника водоснабжения. Он может содержать катионы, такие как калий, натрий, кальций и магний, и анионы, такие как хлориды, сульфаты, карбонаты и бикарбонаты.

3. Растворимость кислорода: пресные водоемы обычно содержат больше кислорода, чем соленые водоемы, потому что кислород лучше растворяется в пресной воде.

4. Температура: температура пресных водоемов зависит от климата и глубины водоема. Обычно температура близка к среднему значению температуры окружающей среды.

5. Осадки и загрязнители: осадки и загрязнители могут влиять на качество и состав пресных водоемов и приводить к загрязнению и потере жизненного пространства для живых существ в воде.



6. Твердость: твердость пресных водоемов зависит от содержания водорастворимых минералов, в основном кальция и магния.

7. Биологический состав: пресные водоемы могут содержать растительную и животную флору и фауну, которые зависят от качества воды и других факторов, таких как температура, рН-значение и наличие питательных веществ.

### 1.1.3 Гидробиологическая характеристика

Гидробиологическая характеристика пресноводных водоемов отражает особенности их биологических систем, влияющих на экологические процессы и качество воды. Она включает описание параметров, определяющих качество воды, видового разнообразия и численности организмов [14].

Основные параметры оценки качества воды включают в себя содержание кислорода, взвешенных веществ, минеральных солей, аммиака, нитритов и нитратов, фосфатов, железа, марганца, биологического кислорода и др.

Состав и количество организмов в пресноводных экосистемах зависят от условий их существования. К числу главных факторов, влияющих на развитие биологической системы, относятся степень загрязнения вода, режим и условия обитания, состав грунта, условия обращения с водой и др.

Гидробиологическая характеристика пресных водоемов позволяет оценить состояние экосистемы и принять меры по ее улучшению. Например, при высоком содержании минеральных солей и фосфатов в воде может произойти благоприятное развитие водорослей, что приведет к образованию эвтрофированных экосистем. В свою очередь, обилие водных растений и животных позволяет повысить качество воды и тем самым улучшить условия для жизни организмов, включая человека.

Комплексная характеристика гидробионтов пресноводных водоемов включает в себя описание их таксономического состава, биомассы, биологической разнообразности, экологической стратегии и биоиндикации.

1. Таксономический состав водных организмов – это список видов, составляющих биологическое сообщество в пресном водоеме. Он может включать в себя микроорганизмы, водоросли, растения, животных и пр.

2. Биомасса – это количественная оценка веса органического вещества биологического сообщества в пресном водоеме. Биомасса может быть выражена в массе воды или площади дна водоема.

3. Биологическая разнообразность – это мера разнообразия видов в биологическом сообществе пресного водоема. Она может включать в себя такие параметры, как индексы Шеннона, Симпсона, Пи перевернутое и многие другие.

4. Экологическая стратегия – это способность гидробионтов приспосабливаться к условиям окружающей среды и продолжать свое существование. Экологическая стратегия включает в себя такие параметры, как тип питания, способность к адаптации к токсичным веществам, термофилия и прочие.

5. Биоиндикация – это использование гидробионтов для оценки качества водной среды. Некоторые гидробионтные организмы чувствительны к уровню загрязнения окружающей среды и могут быть использованы для определения экологического состояния пресных водоемов.

## 1.2 Микробиота пресноводных водоемов

Микробиота пресноводных водоемов включает в себя разнообразные бактерии, археи, грибы и вирусы. Она играет важную роль в поддержании экосистем пресноводных водоемов, от разложения органических веществ до фиксации азота и производства кислорода. Большинство микроорганизмов пресных вод имеют адаптации к различным условиям среды, таким как

температура, рН, концентрация кислорода и питательных веществ. Важно отметить, что изменение состава микробиоты в пресноводных водоемах может привести к нарушениям экосистем и вызвать негативные последствия для животных и растительности, а также для человека.

### 1.2.1 Состав микробиоты

Микробиота пресноводных водоемов включает в себя различные микроорганизмы, включая бактерии, грибы, водоросли и простейшие. Некоторые представители микробиоты являются ключевыми компонентами экосистемы пресноводных водоемов, влияют на качество воды и предоставляют питание для рыб и других животных.

Бактерии микробиоты пресноводных водоемов играют важную роль в биологическом цикле веществ, таких как углерод, азот и фосфор. Они обитают в воде, на поверхности растений и почвы на дне водоема. Некоторые бактерии являются фотосинтезирующими организмами и производят кислород в процессе своей жизнедеятельности.

Водоросли и грибы микробиоты пресноводных водоемов также являются важными участниками экосистемы водоема. Они обеспечивают пищу для рыб и других животных и помогают снижать уровень загрязнения водных ресурсов.

Простейшие являются другой группой микроорганизмов, которые присутствуют в пресных водоемах. Они в свою очередь также являются источником пищи для многих видов рыб и других животных, а также приносят пользу для водных экосистем.

Состав микробиоты в каждом конкретном пресном водоеме может различаться в зависимости от условий его экологической среды и температуры воды.

С экологической точки зрения микрофлору водоемов принято делить на аутохтонную и аллохтонную.

Аутохтонная микрофлора – природная неизменяющаяся микрофлора данного водоема, большинство видов, сюда относящихся, мезофиллы – оптимальный рост которых происходит при температуре 18–20°C. В водоеме с низкой температурой развиваются психрофильные микробы, в горячих водоисточниках – термофильные. В целом аутохтонная микрофлора способствует самоочищению водоемов.

Аллохтонная микрофлора поступает в водоемы вне основных границ – со стоками, смывами, часто отходами человечества. Эта микрофлора в воде обычно длительно не сохраняется, так как водная среда, куда она попадает, по своему химическому составу, температуре, концентрации водородных ионов, как правило, не соответствует нормальным условиям существования данных видов. Более долгому сохранению в водоемах аллохтонной микрофлоры может способствовать одновременное поступление в эти же водоемы субстратов, в которых находилась эта микрофлора (например, фекалий, мокроты).

### 1.2.2 Функции микроорганизмов

Водные микроорганизмы играют значительную роль в круговороте веществ, расщепляя органические продукты животного и растительного происхождения и обеспечивая питательными веществами другие организмы, обитающие в воде.

1. Очистка воды: микроорганизмы пресноводных водоемов играют важную роль в очистке воды от органических и неорганических загрязнений. Бактерии, грибы и водоросли разлагают органические вещества, такие как отходы растений и животных, аммиак, пестициды и прочие химические соединения.

2. Питание животных: микроорганизмы являются важнейшим источником пищи для животных, которые живут в пресноводных водоемах, таких, как микроскопические рачки, креветки и других мелких организмов.

3. Обогащение воды кислородом: фитопланктон и другие водоросли вырабатывают кислород в процессе фотосинтеза, который используется для дыхания пресноводных организмов.

4. Создание биологического равновесия: биологическое равновесие в пресноводных водоемах поддерживается благодаря взаимодействию микроорганизмов, растений и животных. Многие виды микроорганизмов являются важными звеньями в продовольственных цепочках.

5. Формирование гумуса: микроорганизмы пресноводных водоемов участвуют в распаде органических материалов, что приводит к образованию гумуса в донных отложениях водоема. Гумус в свою очередь улучшает плодородие почвы, на которой выращиваются растения.

6. Производство энергии: микроорганизмы пресноводных водоемов могут служить источником производства энергии в виде биогаза или биодизеля.

#### Выводы по главе 1

1. Пресноводные водоемы разнообразны в своих проявлениях, имеют различную структуру, некоторые из них имеют течение, например – реки, другие же, наоборот, стоячие, такие как озера в лесу. Но вне зависимости от структуры водоема в каждом из них находится множество микроорганизмов, в том числе серобактерии. Эти водные микроорганизмы играют большую роль в экосистеме водоемов, занимаются очисткой вод, являются питанием для животных, обогащают воду кислородом, а также поддерживают биологическое равновесие.

2. Микробиота – неотделимая часть любого водного пространства и очень важно иметь представление о составе и количестве микроорганизмов в пресноводном водоеме. Это необходимо для экологической оценки состояния водоема, изучения последствия антропогенной нагрузки на

водоем, а также для решения прикладных задач, в том числе касающихся аквакультуры.

Экологическое состояние водоема оценивается по комплексу показателей, в том числе гидрохимических (содержание кислорода, железа, тяжелых металлов, минеральных солей, аммиака и др.), гидробиологических (состав фито- и зоопланктона, зообентоса и др.), бактериологических (качественный и количественный состав бактериальной флоры). Бактерии являются хорошими индикаторами органического и токсического загрязнения вод и донных отложений.

## Глава 2. СЕРОБАКТЕРИИ В ЭКОСИСТЕМЕ ПРЭСНОВОДНОГО ВОДОЕМА

Серобактерии представляют собой группу бактерий, которые играют важную роль в экосистеме пресноводного водоема. Они являются анаэробными организмами, то есть не требуют наличия кислорода для жизни [28].

Серобактерии участвуют в круговороте органических веществ в водной среде, разлагая мертвые организмы и другие органические отходы. Они также играют ключевую роль в цикле серы.

Кроме того, серобактерии могут быть важными продуцентами энергии в экосистеме водоема. Некоторые виды серобактерий используют сероводород или другие соединения серы в качестве источника энергии для своего метаболизма.

Бесцветные серобактерии, также осуществляющие хемосинтез, подразделяются на два типа:

Одноклеточные – в основном неподвижные (род *Macromonas* и *Achromatium*); нитчатые серобактерии (*Thiothrix*), способные к скольжению.

Оба вида умеют откладывать серу.

Бесцветные серобактерии обитают в морях, океанах, озерах. До конца не изучена их роль в природе, потому что так и не удалось выделить чистую культуру. Исследования, проводимые на основе изучения природного материала, показали, что они играют немалую роль в окислении серных соединений на границе воздушной и безвоздушной среды водоемов.

Серобактерии являются важными участниками процесса очистки водоемов от неорганических загрязнений. Бактерии, содержащиеся в иле, применяются для очистки от сероводорода сточных вод, тем самым препятствуя его утечке в окружающую среду [27].

Они обеспечивают не только круговорот серы в природе. Щелочная сера, производимая этими микроорганизмами, способна стать причиной коррозии канализационных труб, порчи бетонных сооружений, зданий, шахтных и других горнодобывающих конструкций.

Микроорганизмы, относящиеся к бесцветным серобактериям, встречаются и в пресных и в соленых водоемах. Некоторые из них хорошо растут при низкой температуре, другие (*Thiospirillum pistiense*) развиваются в термальных серных источниках при температуре более 50°C. Бесцветные серобактерии – аэробы.

Подвижные формы обладают хемотаксисом и могут перемещаться в места с оптимальным содержанием кислорода и сероводорода. Еще С.Н. Виноградский отметил (1887–1889), что бесцветные серобактерии могут расти в воде, содержащей очень небольшие количества органических веществ, и предполагал поэтому, что они способны усваивать углекислоту. Однако на минеральной среде, содержащей сероводород, удалось выращивать пока в виде чистых культур только *Thiovulum majus* и некоторые штаммы *Beggiatoa*. Другие представители микроорганизмов, определенные как *Beggiatoa*, оказались способными развиваться только на органических средах, содержащих сenny отвар, пептон, мясной экстракт, аминокислоты или ацетат. Некоторые проявили потребность в витамине В<sub>12</sub> [20].

Добавление ацетата и других органических соединений также улучшало рост штаммов *Beggiatoa*, развивающихся на минеральных средах. При наличии ацетата в клетках отмечалось появление гранул поли-р-оксибутирата. На основании изучения физиологии разных штаммов *Beggiatoa* можно прийти к выводу, что среди них есть автотрофы, окисляющие сероводород и фиксирующие СО<sub>2</sub>, и есть представители, нуждающиеся в органических соединениях. Но и ряд гетеротрофных штаммов *Beggiatoa* в присутствии органических соединений окисляет сероводород, возможно, с получением энергии, т. е. они являются хемолитогетеротрофами. Однако биология этих микроорганизмов, а еще в



большой степени других бесцветных серобактерий исследована мало. Особенно заслуживает внимания вопрос о роли сероводорода в их метаболизме.

По морфологии, характеру движения, способу размножения и строению клеток ряд представителей бесцветных серобактерий, как многоклеточные, так и одноклеточные (*Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Thiospirillopsis*, *Thioploca*, *Achromatium*) проявляют большое сходство с синезелеными водорослями. Некоторые исследователи, в частности Прингсхейм (Pringsheim, 1963), рассматривают эти микроорганизмы как бесцветные их варианты.

Аналогом *Beggiatoa* считают сине-зеленую водоросль *Oscillatoria*, *Thiothrix* – *Rivularia*, *Thiospirillopsis* – *Spirulina*, а *Achromatium* похож на *Synechococcus*. Поскольку сине-зеленые водоросли сейчас причисляют к бактериям, то их сближение с бесцветными серобактериями становится все более обоснованным. Следует также отметить, что у некоторых сине-зеленых водорослей обнаружена способность откладывать в клетках серу, хотя один этот признак мало что дает для систематики микроорганизмов.

Микроорганизмы, окисляющие неорганические соединения серы, играют весьма существенную роль в процессах их превращения в природе. Особенно большое значение в круговороте серы, видимо, имеют тионовые бактерии, широко распространенные в различных водоемах, почве и в разрушающихся горных породах.

В результате деятельности этих микроорганизмов, а также бесцветных и окрашенных серобактерий происходит окисление значительной части сероводорода и других соединений серы в водоемах. Причем в некоторых случаях имеет место отложение значительного количества серы. Активное окисление серы тионовыми бактериями в почве нашло практическое применение. Для уменьшения щелочности почвы вносят элементарную серу, которая быстро окисляется этими микроорганизмами с образованием серной кислоты [18].

Так называемое сернокислородное выветривание горных пород также обусловлено деятельностью тионовых бактерий и является результатом образования ими серной кислоты. Такова же нередко причина порчи некоторых каменных и металлических сооружений.

Есть основания считать, что наряду с десульфатирующими бактериями, которые восстанавливают сульфаты до сероводорода, тионовые бактерии участвовали в какой-то степени в образовании некоторых месторождений самородной серы, окисляя сульфиды до молекулярной серы. Но эти же микроорганизмы могут являться основной причиной быстрого разрушения серных руд, проводя окисление до конца, т. е. до серной кислоты. Такие процессы, как показано С.И. Кузнецовым и его сотрудниками, нередко имеют место при разработке серных месторождений, когда создаются аэробные условия.

Таким образом, деятельность микроорганизмов, окисляющих серу и различные ее соединения, по своим результатам достаточно разнообразна, а так же серобактерии играют важную роль в поддержании биологического равновесия в экосистеме пресного водоема.

## 2.1 Серобактерии как компонент микробиоты пресноводного водоема

Сера – это макроэлемент в живых организмах. Сера входит в состав белков (аминокислоты – цистеин, метионин), в т. ч. ферментов, в состав других органических соединений, а также присутствует в составе многих неорганических соединений клетки (преимущественно в виде сульфатов, сульфитов, сульфидов). Сера включена в биогеохимический круговорот веществ. Схема биогеохимического круговорота серы представлена на рисунке 1.

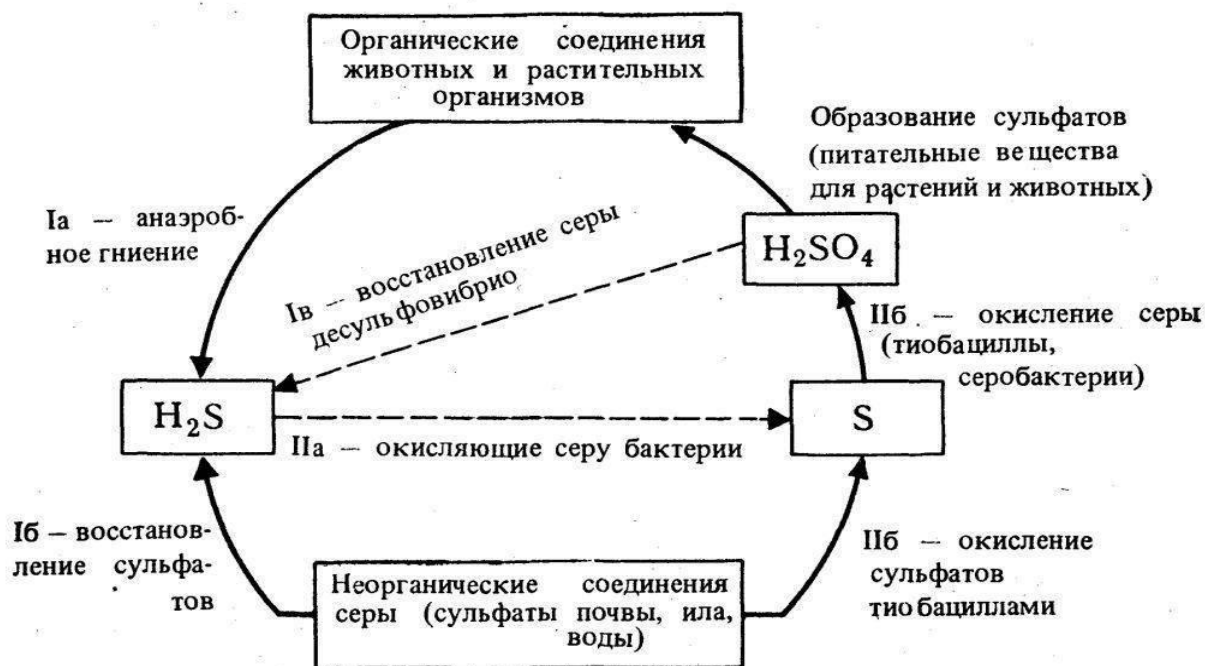


Рисунок 1 – Круговорот серы в природе

### 2.1.1 Систематика и морфология

Активными окислителями восстановленных соединений серы являются следующие группы микроорганизмов:

Тионовые бактерии, представленные четырьмя родами: *Thiobacillus*, *Thiomicrospira*, *Thiodendron* и *Sulfolobus*;

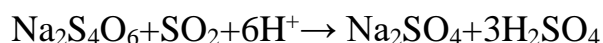
Эти бактерии способны окислять тиосульфат, сероводород, сульфиды, тетрагидраты и тиоцианаты. Бейеринк отнес эти микроорганизмы к особой группе с родовым названием *Thiobacillus*. Род *Thiobacillus* представлен многими видами (*Th. thiooxidans*, *Th. thioparus*, *Th. novellus*, *Th. denitrificans*, *Th. ferrooxidans* и др.).

Бактерии рода *Thiobacillus* представляют собой неспорообразующие грамотрицательные палочки длиной от 1 до 4 мкм и диаметром около 0,5 мкм. Большинство видов этого рода подвижны и передвигаются посредством полярного жгутика [11]. В качестве источника углерода для синтеза

углеводов и других органических соединений бактерии используют CO<sub>2</sub> и бикарбонаты.

За исключением *Th. novellus* и некоторых других видов, относящихся к факультативным хемолитоавтотрофам и хемолитогетеротрофам, представители рода *Thiobacillus* — облигатные хемолитоавтотрофы, то есть живут за счет энергии, выделяющейся в процессе окисления неорганических соединений серы. Ход окислительных процессов, вызываемых серобактериями, может быть представлен следующими уравнениями:

Тетратионаты могут подвергаться дальнейшему окислению до серной кислоты:



По современным представлениям, сера из среды поступает в клеточную вакуоль (наполненную волютином) тиобактерии путем диффузии и накапливается в ней в виде запасного материала. Эта сера может окисляться по мере надобности.

К многоклеточным бесцветным (нитчатым) серобактериям относятся микроорганизмы родов *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiothrix* (Рисунок 2) и другие.

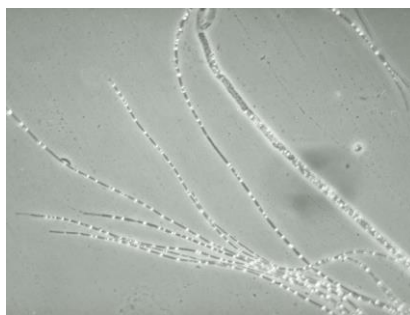


Рисунок 2 – Многоклеточные бесцветные (нитчатые) серобактерии рода *Thiothrix*

Эти организмы окисляют сероводород до элементарной серы, которая временно откладывается внутри клеток. Установлена способность бактерий указанных родов окислять серу и использовать органические вещества.

Они могут обитать в различных экологических условиях: в озерах, прудах, реках, болотах, грунте и даже в кишечнике животных.

Морфологически серобактерии могут иметь различную форму и размер: палочки или спирали. Внешний слой клетки серобактерий состоит из грамотрицательного дополнительного липидного слоя, который дает им устойчивость к окружающей среде и защищает от антибиотиков.

Серобактерии используют сероводород в качестве источника энергии и электрона, он же является основой для большинства функций и циклов в экосистемах пресных водоемов. Некоторые виды способны к аутотрофному росту, синтезируя органические вещества из неорганических соединений с помощью света, а другие являются гетеротрофными и используют готовые органические вещества в качестве источника питания.

Общей особенностью серобактерий является выделение серы в процессе своей жизнедеятельности, что является их важным экологическим вкладом в биохимический цикл редких металлов.

Серобактерии являются важным компонентом пресноводной микробиоты. Серобактерии распространены повсеместно и часто являются доминирующими организмами на дне водоемов. Серобактерии могут образовывать плотные, маслянистые покрытия на поверхности субстратов и камней, составляющих водный горизонт.

Серобактерии могут участвовать в многогранных биогеохимических циклах, связанных с обменом серы, или использовать серу для собственного роста и размножения. Они встречаются в пресноводных экосистемах. Они могут окислять сероводород и выделять его в процессе, называемом окислительно-восстановительной денитрификацией (окисление соединений серы с последующей утилизацией свободного кислорода до других органических соединений) [19].

Важным местом обитания серных бактерий является переход в верхние части водоема. Здесь они могут получать необходимые им питательные вещества и кислород.

Поэтому серные бактерии являются одним из важнейших компонентов пресноводной микробиоты и играют важную роль в обмене серы в этой водной экосистеме.

Фотосинтезирующие бактерии являются преимущественно водными (морскими и пресноводными) организмами и в большинстве случаев играют незначительную роль в производстве органических веществ. Однако они также могут функционировать в условиях, которые часто неблагоприятны для большинства зеленых растений, и участвовать в круговороте некоторых элементов водных отложениях.

Например, зеленые и пурпурные серобактерии играют важную роль в круговороте серы. Эти биофильные анаэробы (способные жить только в отсутствие кислорода), обитают в отложениях с низкой освещенностью и в пограничном слое между окислительной и восстановительной зонами воды [4]. На илистом дне у берега они часто образуют отчетливый розовый или фиолетовый слой чуть ниже верхнего слоя зеленых водорослей, живущих в иле (то есть бактерии находятся в верхней части анаэробной (восстановительной) зоны, где есть свет, но мало кислорода).

В исследованиях на японских озерах (Takahashi and Ichimura, 1968) на долю фотосинтетических серных бактерий приходилось всего 3–5% от общего годового фотосинтетического производства в большинстве озер, но в застойных озерах, богатых  $H_2S$ , эта доля, по оценкам, достигала 25%. Несерные фотосинтезирующие бактерии, как правило, являются факультативными аэробами. В отсутствие света они могут действовать как гетеротрофы, подобно многим водорослям. Таким образом, бактериальный фотосинтез полезен в загрязненных водах и настоящее время разрабатывается, но он не может заменить «настоящий» фотосинтез, вырабатывающий кислород, от которого зависит вся жизнь на Земле.

## 2.1.2 Физиология, особенности метаболизма

Серобактерии – это группа бактерий, которые в большинстве своем представлены облигатными анаэробами (то есть они не выживают в присутствии кислорода).

Особенности метаболизма серобактерий:

1) являются хемоорганотрофами, то есть питаются органическими веществами, получаемыми от растительности (например, целлюлоза) или от животных (например, протеины);

2) способны использовать ацетил-КоА в качестве донора электронов и принимать финальный акцептор электронов – ацетат;

3) обладают специальной системой ферментов, которые разлагают сложные органические соединения на более простые, которые затем используются внутри бактерий;

4) могут метаболизировать глюкозу в присутствии сероводорода, что приводит к образованию серной кислоты;

5) могут использовать дыхательные пигменты для получения энергии в процессе дыхания;

6) производят метаболиты, которые являются промежуточными продуктами метаболизма и могут обладать биологической активностью, например, молочную кислоту, ацетон, этанол и др.

Серобактерии имеют ряд избирательных требований к условиям окружающей среды, таким как температура, рН и наличие кислорода. Они являются хемоорганотрофами, питающимися органическими веществами и веществами на основе азота, серы и фосфора, а также автотрофами, способными синтезировать органические вещества из неорганических соединений.

Метаболизм целобактерий связан с циклом серы, в котором они участвуют как окислители сероводорода. В результате образуется безводная серная кислота, которая может быть преобразована в сероводород или

участвовать в цикле серной кислоты. Некоторые виды серобактерий, такие как *Thiobacillus denitrificans*, осуществляют окислительно-восстановительную денитрификацию как дыхательный процесс, используя соединения серы в качестве энергии для окисления нитрита.

Серобактерии также могут участвовать в углеродном цикле, используя уксусную кислоту, муравьиную кислоту, низкомолекулярные спирты и дрожжи в качестве доноров электронов для окисления углекислого газа. Это позволяет им выживать в среде с низким содержанием органического вещества [2].

Эти физиологические и метаболические свойства серобактерий уникальным образом связаны с их участием в цикле серы и других биохимических циклах и способностью выживать в широком диапазоне условий окружающей среды.

Серобактерии имеют ряд избирательных требований к условиям окружающей среды, таким как температура, pH и наличие кислорода. Они являются хемоорганотрофами, питающимися органическими веществами и веществами на основе азота, серы и фосфора, а также автотрофами, способными синтезировать органические вещества из неорганических соединений.

Метаболизм целобактерий связан с циклом серы, в котором они участвуют как окислители сероводорода. В результате образуется безводная серная кислота, которая может быть преобразована в сероводород или участвовать в цикле серной кислоты. Некоторые виды серобактерий, такие как *Thiobacillus denitrificans*, осуществляют окислительно-восстановительную денитрификацию как дыхательный процесс, используя соединения серы в качестве энергии для окисления нитрита.

Серобактерии также могут участвовать в углеродном цикле, используя уксусную кислоту, муравьиную кислоту, низкомолекулярные спирты и дрожжи в качестве доноров электронов для окисления углекислого газа. Это



позволяет им выживать в среде с низким содержанием органического вещества.

Таким образом, физиологические и метаболические свойства серобактерий связаны с их способностью самостоятельно участвовать в цикле серы и других биохимических циклах и выживать в широком диапазоне условий окружающей среды [9].

Сера утилизируется бактерией после предварительного растворения в липидных веществах, выделяемых бактерией в окружающую среду. Когда *T. thiooxidans* растет в среде, содержащей молекулярную серу, в ней обнаруживаются фосфолипиды. По одним данным, это фосфатидилинозитол, по другим – несколько иные соединения (фосфатидил-N-метилэтанол, фосфатидилглицерин и дифосфатидилглицерин), накопление которых совпадает с активной фазой роста культуры. Однако последнее предположение не было доказано. Контакт бактерий с клетками имеет важное значение для окисления серы бактериями, и выделение некоторых «смачивающих» серу веществ также может быть важным. Данные о пути окисления серы также весьма противоречивы.

Считается, что образование тиосульфата является неферментативным процессом и протекает без участия бактерий. Ряд исследований был посвящен окислению тиосульфата. Данные экспериментов с цельноклеточными и бесклеточными препаратами различных видов *Thiobacillus* позволяют предположить, что начальные стадии превращения тиосульфата можно рассматривать либо как восстановление под действием редуктазы с образованием сероводорода и сульфита, либо как расщепление до элементарной серы и сульфита и, наконец, окисление до тетратионовой кислоты и окончательное превращение в тритонаты и сульфиты. Реакцией, которая расщепляет тиосульфат с образованием сульфита, является родоназа, которая связывает серу в виде тиоцианата: она распространена у животных, а также у тиосульфатных бактерий [9].

### 2.1.3 Среда обитания

Серобактерии – это группа бактерий, которые обитают в разнообразных средах. Они могут встречаться в почве, озерах, реках, морских водах, воздухе, кишечнике животных и человека.

Большинство серобактерий – аэробные (дышащие кислородом) организмы, но есть и анаэробные (живущие без кислорода) серобактерии. Они образуют споры, которые помогают им переживать экстремальные условия, такие как недостаток питания и крайние температуры.

Некоторые виды серобактерий способны жить в условиях высокой солености, кислотности или щелочности. Например, серобактерии рода *Halomonas* обитают в кристаллах соли в Средиземном море. Другие виды серобактерий способны жить в условиях низкой температуры, такие как пайщики, обитающие в Антарктиде.

Большинство серобактерий является автотрофами, то есть синтезируют органические вещества из неорганических. Они используют различные источники энергии, такие как свет, химические соединения, метан, аммиак и многие другие.

Существуют также патогенные серобактерии, вызывающие различные заболевания человека и животных, такие как болезнь Лайма (*Borrelia burgdorferi*) и септицемии (*Pseudomonas aeruginosa*). Однако большинство серобактерий не является опасными для человека и находятся в экологическом балансе с окружающей средой [18].

В целом, серобактерии – это очень разнообразная группа бактерий, обладающая адаптивной способностью и способной обитать в самых различных средах. Эти организмы играют важную роль в экосистемах, воздействуя на круговорот веществ и являясь источником пищи для многих живых организмов.

## 2.2 Роль серобактерий в экосистеме пресноводного водоема

Серные бактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах. Серные бактерии являются одним из основных участников круговорота серы, важного процесса в экосистемах. Серные бактерии используют сероводород, диоксид серы и другие соединения серы в качестве источника энергии для своей жизнедеятельности. Серные бактерии участвуют в денитрификации, окислении сероводорода и других соединений серы, что приводит в равновесие водную среду и поддерживает жизнь других организмов. Серные бактерии также используются в качестве индикаторов качества воды, их присутствие указывает на загрязнение водоема. Кроме того, серобактерии являются важным источником пищи для других организмов в пресноводных экосистемах. Например, некоторые виды рыб выживают за счет серобактерий даже в условиях низкой трофики. Таким образом, серобактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах, поддерживая баланс водной среды и обеспечивая выживание других организмов.

Другие (аэробные) бактерии окисляют сероводород до серы (которая может накапливаться в виде фоторефрактивных гранул, рассеянных в цитоплазме) и в конечном итоге до серной кислоты [18].

Двустворчатые моллюски также имеют симбиотические отношения с серными бактериями, которые поселяются в теле двустворчатого моллюска и извлекают кислород и углекислый газ из водного потока, окисляя серу, чтобы обеспечить хозяина необходимыми для выживания компонентами. Крабы не вступают в симбиотические связи с серными бактериями, но питаются зооксантеллами и адаптируются, чтобы избежать отравления серой, окисляя серу до нетоксичного соединения тиосульфата. Гетеротрофы и симбионты составляют 75% биомассы этой уникальной экосистемы. Хищники включают крабов, брюхоногих моллюсков и некоторых рыб (макрофауна).

Открытие этих «оазисов жизни» вблизи гидротермальных источников в глубоководной рифтовой зоне побудило исследователей искать

симбиотические бактерии в богатых сероводородом местах обитания, таких как мангровые леса, соленые болота, нефтяные резервуары и очистные сооружения. Бактерии накапливают большое количество серы только при наличии большого количества органического вещества из внешних источников или производимого фитопланктоном и отсутствии большого притока наземного материала (наземного мусора), который снижает содержание серы за счет разбавления. Когда сера накапливается в организмах, происходит бактериальное дыхание в присутствии сероводорода, который окисляется до серной кислоты. Когда он истощается, накопленная в организме сера окисляется до серной кислоты. Наконец, она смешивается с углеродистыми веществами в воде, образуя гипс. Другими словами, эта сера является резервным веществом для процесса дыхания в отсутствие сероводорода.

Озерный ил характеризуется очень высоким содержанием бактерий. Даже во влажном иле количество бактерий достигает 200–400 миллионов на грамм. Поверхностный слой озерного ила наиболее богат бактериями. Поверх него образуется специальная бактериальная мембрана. Эта мембрана содержит значительное количество нитчатых серных бактерий, которые важны для жизнеобеспечения водоема [18]. Эти бактерии окисляют образующийся в осадке сероводород в серную кислоту и не дают ей попасть в воду. Когда эта мембрана нарушается, сероводород попадает в воду, сильно ослабляя живущие в ней организмы. Это часто приводит к заморозке рыбы.

Бактерии в подземных водах выполняют ряд геохимических функций, в том числе изменяют химический и газовый состав воды. Следует подчеркнуть, что многие бактерии, присутствующие в подземных водах, безвредны для человека и даже играют определенную роль в очистке воды, загрязненной бактериями.

Оптимальной средой для роста бактерий является pH 7–8. Однако возможны колебания. Например, нитритные бактерии процветают при

pH 6–9, а нитратные бактерии – при pH 6,5–8,6. Некоторые серные бактерии могут существовать при pH 1–4, т.е. в сильноокислой среде.

Окислительная активность тиоиновок бактерий в сульфидных месторождениях может нанести значительный ущерб, делая сотни и тысячи тонн руды непригодными для переработки на плавильных заводах. Разработка сульфидных месторождений требует постепенного снижения уровня сероводорода без длительного воздействия на сульфидоносные породы.

Кислоты в сточных водах, такие как серная и соляная кислота, также обладают бактерицидными свойствами. Натриевые соли обладают гораздо меньшим бактерицидным действием на бактерии, чем свободные кислоты, поэтому риск загрязнения рек болезнетворными бактериями не увеличивается при смешивании промышленных сточных вод с бытовыми удобрениями.

Данные о распределении стабильных изотопов серы и углерода в различных породах сыграли важную роль в определении происхождения серных месторождений в Прикарпатье. Изучение изотопного состава пород указывает на то, что сульфатредуцирующие бактерии участвовали в восстановлении серной кислоты в древних водоемах.

В биофильтрах, очищающих подземные воды из сульфидных месторождений, содержащих до 200 мг/л сульфида, общее количество бактерий составляет около 1–10<sup>12</sup> на м<sup>3</sup> загрузки. Процесс выщелачивания основан на прямом окислении сульфидов бактериями и взаимодействии сульфида железа и сульфида меди. Сульфид железа и оксид железа орошаются раствором бактерий, подкисленным серной кислотой. После восстановления меди часть железа и алюминия удаляется из оросительного раствора в отстойниках [2].

Серные бактерии также влияют на компостирование отходов двумя способами – аэробным и анаэробным, в зависимости от биохимической природы бактериологического процесса. В аэробном процессе бактерии

используют кислород для питания органическими веществами в отходах, производя собственную клеточную протоплазму из имеющихся углерода, азота и фосфора. Большая часть углеродистых веществ преобразуется в  $\text{CO}_2$ , а большая часть остатков преобразуется в простые соединения, которые очень полезны для роста растений. Аэробная ферментация происходит в природе в больших масштабах и является единственным способом превращения полевых и лесных остатков в гумус. При анаэробной ферментации разложение происходит в отсутствие кислорода, и углерод в ферменте преобразуется в метан, а не в  $\text{CO}_2$ , как при аэробной ферментации. В природе этот процесс происходит на дне водно-болотных угодий. При окислении серы образуются дурно пахнущие меркаптаны, а не серная кислота, как при аэробной ферментации.

Деятельность этих микроорганизмов, а также бесцветных и цветных серных бактерий окисляет сероводород и большинство других соединений серы в водоемах. В некоторых случаях значительные количества серы выпадают в осадок. Активное окисление серы тионовыми бактериями в почве также имеет практическое применение. Сера добавляется в почву для снижения ее щелочности, но быстро окисляется этими микроорганизмами до серной кислоты.

Микрофлора горных пород активно участвует в выветривании (разрушении) горных пород кислотами, такими как серная кислота - продукт ее биологической деятельности [14]. Легко предположить, что такие материалы, как торф и каменный уголь, которые содержат лигнин и гуминовую кислоту, также являются подходящими субстратами для микроорганизмов. Нефть и углеводороды успешно перерабатываются микроорганизмами. Благодаря этим процессам, современный человек хочет (и уже преуспел в этом) промышленным способом получать из нефтепродуктов микробные вещества (белки), которые затем можно использовать в качестве корма или пищи. Микроорганизмы могут окислять сульфидные руды, выщелачивать серу и повышать содержание металлов

(особенно цветных и редких). Эти процессы лежат в основе гидрометаллургических методов. Гидрометаллургия – это быстро развивающаяся отрасль, использующая микроорганизмы для разработки несовершенных руд, трудно поддающихся обработке [14].

Наиболее важным свойством, определяющим химические свойства материалов, используемых в канализационных трубах, является их устойчивость к коррозии и разрушению в результате контакта с водой. Как внутри, так и снаружи трубы должны обладать отличной устойчивостью к электрохимическому и химическому воздействию окружающей почвы и сточных вод, транспортируемых по трубе. Коррозия возникает на концах труб. Сероводород образуется в результате деятельности бактерий в анаэробных сточных водах. Распространен в странах с теплым климатом, где канализационные трубы имеют небольшой уклон.

Влага, конденсирующаяся на внутренней поверхности трубы, поглощает сероводород, который преобразуется в серную кислоту аэробными бактериями. Если материал трубы не является химически стойким, серная кислота в конечном итоге разрушит трубу. Наиболее эффективной мерой по предотвращению коррозии является выбор труб из коррозионно-стойких материалов, таких как керамика или пластик. Более крупные трубы изготавливаются из железобетона, в этом случае внутренняя поверхность трубы покрывается защитным покрытием, таким как древесный уголь, винил или эпоксидная смола. Образование сероводорода в канализационных трубах можно в некоторой степени предотвратить, прокладывая трубы под максимально допустимым уклоном и вентилируя систему сбора. Коррозия на дне труб часто вызывается кислыми промышленными стоками. В этом случае лучшим решением для защиты труб является ограничение поступления кислотных сточных вод в городскую канализацию. Бетонные трубы можно защитить от коррозии на дне трубы с помощью антикоррозийных покрытий, например, керамической плитки [11].

### 2.3 Влияние деятельности серобактерий на некоторые показатели экологического состояния пресноводного водоема

Пресноводные водоемы, такие как реки, озера и пруды, представляют собой множество экологических систем, населенных различными живыми организмами, которые влияют на их качество. Среди таких организмов выделяются бактерии, которые являются ключевыми игроками в экосистемах пресных водоемов.

Существует множество видов бактерий, в том числе и серобактерии, которые одним из основных сценариев своей жизнедеятельности используют сероводород в качестве электронного донора. Серобактерии, как правило, не живут в условиях насыщенной кислородом среды, и поэтому основная часть их жизнедеятельности проходит в более обедненных кислородом зонах водоемов, таких как субстраты вблизи дна [16].

Серобактерии существенно влияют на содержание сероводорода в пресных водоемах, но это не единственный показатель экологического состояния, который они затрагивают. Например, серобактерии вовлечены в процесс переработки органических веществ, выстилающих дно водоемов. В результате процесса бактериального распада органических веществ выделяются различные соединения, такие как аммиак, нитраты и фосфаты, которые могут оказаться вредными для флоры и фауны водоемов, если их концентрация слишком высока.

Однако серобактерии также могут играть положительную роль в экосистемах пресных водоемов. Например, некоторые виды серобактерий вовлечены в процесс фиксации азота, при котором азот связывается с молекулами кислорода, что облегчает доступ растениям к азоту. Это повышает рост водных растений и улучшает условия рыболовства, что в свою очередь положительно сказывается на эстетическом и экономическом значении водоемов [18].



Бесцветные серные бактерии – это группа микроорганизмов, участвующих в реакциях окисления в геохимическом цикле серы. Типичные бесцветные серные бактерии распространены во многих водоемах, включая пресные, морские, морские термальные воды и антропогенные экосистемы. Они встречаются в пограничной зоне между аэробной и анаэробной зонами и играют важную роль в окислении органических и неорганических токсичных соединений серы, предотвращая их попадание в верхние воды. Исследования серобактерий активизировались в последнее десятилетие, поскольку крупномасштабные экологические исследования в гидротермально активных морских экосистемах значительно расширили наше понимание экологии серобактерий в галофильных сообществах.

Было установлено, что серобактерии родов *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiomargarita* и другие серобактерии составляют значительную часть общего производства нитратов в море, поскольку они обладают вакуолями, в которых накапливаются высокие концентрации нитратов, и действуют как терминальные акцепторы электронов. Особый интерес представляют маты, в которых доминируют бесцветные серобактерии (*Beggiatoa*, *Thioploca*). Бактериальные маты характеризуются высокой продуктивностью и широким распространением в водных экосистемах и являются эффективными биогеохимическими фильтрами в процессе трансформации и преобразования соединений углерода, серы и азота [18].

Таксономический состав групп бесцветных серобактерий плохо изучен из-за сложности выделения и поддержания чистых культур. Большинство так называемых «морфологических видов», известных из наблюдений за природными популяциями, не могут быть выделены в чистой культуре. Применение современных молекулярно-биологических методов показало, что представители бесцветных серобактерий принадлежат к различным таксономическим и филогенетическим группам. Филогенетический анализ некоторых серобактерий из природных популяций был проведен методом флуоресцентной гибридизации, однако филогенетическое положение

представителей некультивируемых серобактерий еще не определено. Несмотря на высокий интерес к этим микроорганизмам и их геохимической деятельности, количественных данных, отражающих роль бесцветных серобактерий в круговороте веществ в природе, мало. Необходимо изучить метаболизм новых изолятов, чтобы понять их функциональную роль в микробных сообществах. В настоящее время данные о метаболическом разнообразии бесцветных серобактерий ограничены [16].

У большинства серобактерий метаболические пути для углерода и серы неизвестны, а механизмы регуляции метаболических путей в быстро меняющихся градиентных условиях не изучены. Поскольку бесцветные серобактерии живут в неравновесных условиях окружающей среды, выявление факторов среды, влияющих на них, имеет огромное значение и поможет определить «уязвимые» участки клеточного метаболизма и понять стратегии биохимической адаптации к условиям окружающей среды. Большинство бесцветных серобактерий являются микроаэрофильными, что объясняет их экологическую специфичность и сложность получения чистой культуры. Однако существует мало данных о регуляторных механизмах клеточного метаболизма в условиях насыщения кислородом у ахроматических серобактерий, а ответ бактериальной стресс-лимитирующей антиоксидантной системы на образование реактивных форм кислорода (ROS) не изучен. Таким образом, анализ имеющихся данных по ахроматическим серобактериям показывает, что знания об их разнообразии, филогении и адаптивных механизмах и регуляции метаболизма не имеют четкого понимания [18].

Таким образом, серобактерии являются ключевыми игроками в экосистемах пресных водоемов, и, несмотря на то, что они могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на качество водоемов, они во многом определяют и экологическое состояние водной среды. Поэтому, понимание роли серобактерий и их поведения в различных

условиях могут помочь в эффективном управлении искусственных и естественных водоемов.

## Выводы по главе 2

1. Группа пресноводных бесцветных серобактерий гетерогенна по составу. Несмотря на невысокую среднюю долю серобактерий от общего количества микроорганизмов биосферы – от 2 до 5%, в отдельных заболоченных водоемах их количество может достигать 25%.

Серные бактерии играют одну из важнейших ролей в биогеохимическом цикле серы, используя сероводород, диоксид серы и другие соединения серы в качестве источника энергии для своей жизнедеятельности.

2. Серные бактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах. Они поддерживают саморегуляцию пресноводных водоемов, способствуют образованию торфа, быстрому росту бактерий и водорослей. Активно взаимодействуют с ракообразными и моллюсками, способствуют их росту.

Серные бактерии участвуют в денитрификации, окислении сероводорода и других соединений серы, что приводит в равновесие водную среду и поддерживает жизнь других организмов. Эти бактерии используют в качестве индикаторов качества воды, поскольку их присутствие указывает на загрязнение водоема.

Кроме того, серобактерии являются важным источником пищи для других организмов в пресноводных экосистемах. Например, некоторые виды рыб выживают за счет серобактерий даже в условиях низкой трофики.

Таким образом, серобактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах, поддерживая баланс водной среды и обеспечивая выживание других организмов, и во многом определяют экологическое состояние водной среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Земле очень много различных водных систем, от морей до болотистых местностей, и практически везде мы можем встретить серные бактерии. Изучение серобактерий поможет во многих сферах деятельности человека, например, в аквакультуре, где количество серы напрямую влияет на жизнедеятельность водных гидробионтов.

Серобактерии – это класс бактерий, которые могут обитать в разных типах водоемов, включая пресноводные. Они играют важную роль в экосистемах водоемов, выполняя функции в пищевых цепях, участвуя в переработке и превращении органических веществ, фиксации азота и образовании сульфатов.

В пресноводных водоемах встречаются разные виды серобактерий, включая сероводородные бактерии, серомучнистые бактерии, серноокисляющие бактерии и др.

Сероводородные бактерии используют сероводород в качестве источника энергии и превращают его в сульфаты, что может привести к снижению концентрации сероводорода в воде и улучшению ее качества для жизни других организмов. Однако, при переизбытке сероводорода, эти бактерии могут выделять сероводород, что может привести к образованию смертельной для других организмов концентрации сероводорода в воде.

Серноокисляющие бактерии используют серную кислоту в качестве источника энергии и образуют сульфаты. Они способны также избавлять воду от аммиака, азота и фосфора, что может улучшить качество воды.

Однако в переизбытке серобактерии могут привести к негативным последствиям для водной экосистемы. Это может включать ухудшение качества воды, изменение pH и уменьшение доступности кислорода для других организмов в воде. Это может привести к снижению численности

крупных обитателей водоема, таких как рыбы, а также влиять на качество водной среды и здоровье других организмов, включая человека.

Следует отметить важную роль серобактерий в переработке отходов – мусора, канализационных стоков, что широко используется в промышленных процессах переработки отходов и очистки сточных вод.

Серные бактерии распространены в водах и почвах морей, озер и серных источников, содержащих сероводород, и встречаются в почвах, сульфидных месторождениях и сульфидных минералах. Они часто образуют большие скопления. Они активно участвуют в естественном круговороте серы и предотвращают накопление токсичного сероводорода в воде, без этих бактерий водоемы просто не смогли бы существовать.

Серные бактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах. Они поддерживают саморегуляцию пресноводных водоемов, способствуют образованию торфа, быстрому росту бактерий и водорослей. Активно взаимодействуют с ракообразными и моллюсками, способствуют их росту.

Серные бактерии участвуют в денитрификации, окислении сероводорода и других соединений серы, что приводит в равновесие водную среду и поддерживает жизнь других организмов. Эти бактерии используют в качестве индикаторов качества воды, поскольку их присутствие указывает на загрязнение водоема.

Кроме того, серобактерии являются важным источником пищи для других организмов в пресноводных экосистемах. Например, некоторые виды рыб выживают за счет серобактерий даже в условиях низкой трофики.

Таким образом, серобактерии играют важную роль в пресноводных экосистемах, поддерживая баланс водной среды и обеспечивая выживание других организмов, и во многом определяют экологическое состояние водной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекин О.А. Химия океана. Ленинград, 1966. 349 с.
2. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. Москва : Логос, 2000.
3. Анруз Дж. Введение в химию окружающей среды. Москва : Мир, 1999.
4. Болбас М.М. Основы промышленной экологии. Москва : высшая школа, 1993.
5. Большая российская энциклопедия. Серобактерии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/serobakterii> (дата обращения: 02.05.2023).
6. Варламов В.С., Грин М.Ф. Общий обзор. Москва : Мысль, 1992. 178с.
7. Винокуров Н.Ф., Камерилова Г.С. Методическое пособие по курсу природопользование. Москва : Просвещение, 1996. 205 с.
8. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздательство, 1991. 289 с.
9. Ганиев Р. Исследование крупных бактерий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hi-news.ru/research-development/uchenye-otkryli-samyebolshie-bakterii-v-mire.html> (дата обращения: 18.05.2023).
10. Горохова С.С., Косолапова Н.В., Прокопенко Н.А. Основы микробиологии, производственной санитарии и гигиены. Москва : Академия, 2008. 64 с.
11. Громов Б.В. Удивительный мир архей // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 4. С. 23-26.
12. Жарикова Г.Г. Микробиология продовольственных товаров. Санитария и гигиена. 2-е изд., стереот. Москва : Академия, 2007. 304 с.: ил. (Среднее профессиональное образование)

13. Зенкевич Л.А. Биология морей СССР. Москва, 1963. 56 с.
14. Зенкевич Л.А. Моря СССР, их фауна и флора. Москва, 1956. 343с.
15. Зенкевич Л.А. Фауну и биологическая продуктивность моря. Москва, 1951. 134 с.
16. Колешко О.И., Завезенова Т.В. Микробиология с основами вирусологии: Учебник - Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1999. 378с., ил.
17. Кондратьева Е.Н. Хемолитотрофы и метилотрофы. Москва : Изд-во МГУ, 1983. 172 с.
18. Ливчак И.Ф. Охрана окружающей среды. Москва : Наука, 2000. 177 с.
19. Мармузова Л.В. Основы микробиологии, санитарии и гигиены в пищевой промышленности: учеб. пособ. для СПО. 2-е изд., стереотип. Москва : Академия, 2004. 136 с.: ил. (Федеральный комплект учебников)
20. Майлз Л., Варли К. География. Энциклопедия. Москва : РОСМЕН, 1995. 50 с.
21. Микробиология: учебник для студ. высш. учеб.заведений /А. И. Нетрусов. И. Б. Котова. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
22. Образовательный портал. Серобактерии в биологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://obrazovanie-gid.ru/pereskazy1/serobakterii-eto-v-biologii.html> (дата обращения: 18.05.2023).
23. Одум Ю. Основы экологии. Москва, 1975. 311 с.
24. Основы биологии. Хемосинтез [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://biology.su/molecular/chemosynthesis> (дата обращения: 18.05.2023).
25. Особенности жизнедеятельности серобактерий, окисляющих неорганические соединения [Электронный ресурс] // Свободная энциклопедия. Режим доступа: <https://probakterii.ru/prokaryotes/species/serobakterii.html> (дата обращения: 28.05.2023).

26. Пианка Э. Эволюционная экология. Москва, 1981. 65 с.
27. Серобактерии [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Серобактерии> (дата обращения: 11.05.2023).
28. Черникова Л.П. Санитария и гигиена в торговле и пищевой промышленности: учеб. пособ. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. 319 с.: ил. (Среднее профессиональное образование)
29. Шилов Ю. М. Общая химия / Ю. М. Шилов, Ю. И. Смушкевич. - М.: РОСМЕН, 1983.
30. Шильникова В.К. Микробиология: учеб.пособ. Москва: Дрофа, 2006. 268 с.: ил. (Среднее профессиональное образование)
31. Шлегель Г. Общая микробиология: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987.