

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра микробиологии и физиологии растений

**АНАЛИЗ МАКРОФИТНО-БАКТЕРИАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ В
ВОДНЫХ БИОЦЕНОЗАХ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 422 группы
направления подготовки бакалавриата 06.03.01 Биология
биологического факультета
Нефедовой Владлены Сергеевны

Научный руководитель

д-р биол. наук, доцент

Д.В. Уткин

Зав. кафедрой

д-р биол. наук, доцент

Д.В. Уткин

Саратов 2026

Введение. Макрофитно-бактериальные ассоциации играют ключевую роль в функционировании водных экосистем, участвуя в деструкции органического вещества, круговоротах биогенных элементов и самоочищении водоёмов [1, 2]. Высшие водные растения (ВВР) служат субстратом для формирования эпифитных и эндофитных бактериальных сообществ, видовой состав и численность которых отражают трофический статус и уровень антропогенной нагрузки на водный объект [3, 4]. Несмотря на высокий индикаторный потенциал макрофитов, комплексные исследования макрофитно-бактериальных ассоциаций в водоёмах Саратовской области до настоящего времени не проводились.

Цель работы — анализ макрофитно-бактериальных ассоциаций в водных биоценозах Волгоградского водохранилища и его притоков.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. Выделить эпифитные, эндофитные бактерии из водных и околоводных растений-макрофитов.
2. Определить численные показатели эпифитной и эндофитной микробиоты и бактериопланктона.
3. Выявить способность эпифитных микроорганизмов к биопленкообразованию.
4. Выявить качественные и количественные закономерности видового состава эпифитных, эндофитных микроорганизмов и бактериопланктона у разных видов растений, собранных с разных мест обитания

Научная новизна. Впервые для водоёмов Саратовской области проведён систематический сравнительный анализ эпифитной, эндофитной микробиоты и бактериопланктона на фоне количественной оценки загрязнения. Впервые с помощью кластерного анализа (индекс Жаккара) установлено, что видовой состав микроорганизмов-ассоциантов зависит не только от вида макрофита, но и от гидрологического режима водоёма [1, 4]. Выявлены штаммы *Bacillus pseudomycooides* и *B. amyloliquefaciens*, обладающие высокой устойчивостью к абиотическим факторам и способностью к биоплёнкообразованию [2,6].

Структура и объём работы. Работа изложена на 51 странице машинописного текста и включает: введение, обзор литературы, материалы и методы исследований, 1 раздел результатов исследований, заключение, выводы, список использованных источников, содержащий 51 наименование, из них 34 отечественных, 17 зарубежных.

Основное содержание работы. В обзоре литературы представлены современные сведения о роли макрофитов в водных экосистемах (продуцирование кислорода, создание устойчивых местообитаний), о бактериальных сообществах (виды, функции, участие в минерализации и циклах питательных веществ) и о макрофитно-бактериальных ассоциациях (симбиотические отношения, негативные последствия, экологическое значение) [1, 3]. Отдельный подраздел посвящён денитрификации и биоремедиации [2, 3].

Материалы и методы исследований. В работе использовали образцы четырёх видов макрофитов (рдест блестящий *Potamogeton lucens* L., 1753; рдест пронзеннолистный *Potamogeton perfoliatus* L., 1753; тростник обыкновенный *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; рогоз обыкновенный *Typha latifolia* L., 1753) и пробы воды из девяти точек акватории Волгоградского водохранилища вблизи г. Саратова и его притоков (мкр-н Увек, б/о «Химик», р. Мечетка, оз. Сазанка, прот. Сазанка, с. Пристанное, р. Курдюм, зал. Курдюмский, с. Сабуровка).

Выделение бактерий проводили методом прямого посева воды (разведение 10^{-3}) на ГРМ-агар, методом отпечатка — для эпифитов и гомогенизацией стерилизованных тканей с последующим посевом на твердые питательные среды — для эндофитов [7]. Идентификацию изолятов осуществляли по фенотипическим признакам с использованием определителя бактерий Берджи (Bergey's Manual of Systematic Bacteriology) и при помощи электронного определителя ABIS. Для точной идентификации применяли метод MALDI-TOF масс-спектрометрии на приборе Microflex (Bruker Daltonics, Германия) [4, 6]. Изучали субстратные спектры (источники углерода и азота), устойчивость к температуре (плюс 10 °С, плюс 43 °С), pH (5–10) и NaCl (5–

10%), фитопатогенную активность (мацерация тканей корнеплодов) и способность к биоплёнкообразованию [3, 4]. Видовое сходство водных бактерий и бактерий-ассоциантов макрофитов оценивали по индексу Жаккара с последующим кластерным анализом [1, 3].

Результаты исследования. Всего идентифицировано 32 штамма бактерий, относящихся к 14 видам. Доминирующим родом оказался *Bacillus* (65% изолятов). Максимальный индекс встречаемости (100%) имел вид *Bacillus pseudomycooides*, выделенный из всех проб без исключения (таблица 1).

Таблица 1 — Индекс встречаемости бактерий в различных объектах исследования

	Вода	Рдест прозеннолистный	Рдест блестящий	Рогоз обыкновенный	Тростник обыкновенный
<i>B. altitudini</i>	0	0	25,0	0	0
<i>B. amyloiticus</i>	0	14,3	0	14,3	0
<i>B. amyloliquefaciens</i>	37,5	28,6	25,0	28,6	0
<i>B. lentus</i>	0	0	25,0	14,3	0
<i>B. licheniformis</i>	0	14,3	0	0	0
<i>B. megaterium</i>	12,5	0	0	14,3	33,3
<i>B. nepalensis</i>	12,5	0	0	0	0
<i>B. pseudomycooides</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>B. psychrotolerance</i>	0	0	0	14,3	0
<i>C. amalonaticus</i>	0	0	0	28,6	0
<i>E. asburiae</i>	0	0	25,0	0	0
<i>L. sphaericus</i>	0	0	0	14,3	0
<i>S. sciuri</i>	12,5	14,3	0	0	0
<i>S. xylosus</i>	0	14,3	0	14,3	0

Численность бактерий варьировала от 5,0 до 10,1 lg КОЕ/г (мл). Максимальные значения (10,1 lg КОЕ/г) зафиксированы в Курдюмском заливе и р. Мечетка (замедленный водообмен, высокая антропогенная нагрузка), минимальные — в мкр-не Увек (5,0–5,3 lg КОЕ/г). Концентрация бактериопланктона (10^6 – 10^{10} КОЕ/мл) соответствует полисапробной зоне (таблицы 2–4).

Таблица 2 — Количественные показатели бактерий в пробах, отобранных в Волгоградском водохранилище

Точки	Виды бактерий	Вода КОЕ/мл	Рдест пронз.		Рдест блест.		Рогоз обыкн.		Тростник обыкн.	
			эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г
Увек	<i>B. amyloliquefaciens</i>	0	0	0	-	-	10 ⁶ -10 ⁸	10 ² -10 ³	-	-
	<i>B. pseudomycooides</i>	10 ⁵ -10 ⁸	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ⁵	-	-	10 ⁴ -10 ⁷	10 ² -10 ⁴	-	-
т/б Хилик	<i>B. amyloliquefaciens</i>	10 ² -10 ⁴	-	-	0	0	0	0	-	-
	<i>B. lentus</i>	0	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	0	0	-	-
	<i>B. pseudomycooides</i>	10 ⁴ -10 ⁷	-	-	10 ⁵ -10 ⁶	10 ² -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁷	10 ² -10 ³	-	-
	<i>L. sphaericus</i>	0	-	-	0	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-
С. Пристанное	<i>B. amyloliquefaciens</i>	10 ² -10 ⁴	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-	-	-	0	0
	<i>B. licheniformis</i>	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-	-	-	0	0
	<i>B. pseudomycooides</i>	10 ⁵ -10 ⁹	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ⁴	-	-	-	-	10 ⁴ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁴
Зап. Курдомский	<i>B. amyloliquefaciens</i>	0	10 ² -10 ⁴	-	-	-	-	-	0	0
	<i>B. nepalensis</i>	10 ² -10 ³	0	-	-	-	-	-	0	0
	<i>B. pseudomycooides</i>	10 ⁴ -10 ⁷	10 ⁵ -10 ⁷	10 ² -10 ³	-	-	10 ⁵ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³
	<i>S. xylosus</i>	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-	10 ³ -10 ⁴	10 ¹ -10 ²	0	0
С. Сабуровка	<i>B. pseudomycooides</i>	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁴ -10 ⁷	10 ² -10 ³	-	-	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ⁴	-	-
	<i>C. amalonaticus</i>	0	0	0	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-
	<i>B. megaterium</i>	10 ² -10 ³	0	0	-	-	0	0	-	-

Наиболее устойчивыми к абиотическим факторам оказались виды *B. pseudomycooides* и *B. amyloliquefaciens*, сохраняющие жизнеспособность при плюс 10 – плюс 43 °С, рН 5–10 и NaCl до 10% [4, 7]. Максимальной биоплёнкообразующей способностью обладали эти же виды (рисунок 1) [4]. Выявлена мацерирующая активность *B. pseudomycooides* в отношении 90% тест-культур (свёкла, морковь) [6].

Сравнительный анализ индекса общности видов между разными макрофитами показал максимальное сходство между двумя погружёнными видами (рдест блестящий и рдест пронзеннолистный), что объясняется их единой экологической нишей (таблица 5) [2, 4]. Напротив, минимальные значения индекса отмечены при сравнении полностью погружённых и наземно-водных растений.

Таблица 3 — Количественные показатели бактерий в пробах, отобранных в притоках Волгоградского водохранилища

Точки	Виды бактерий	Вода КОЕ/мл	Рдест произ.		Рдест блест.		Рогоз обыкн.		Тростник обыкн.	
			эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г
р. Мечетка	<i>B. altitudini</i>	0	0	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	0	0	-	-
	<i>B. amyloticus</i>	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	0	0	10 ² -10 ⁴	10 ¹ -10 ²	-	-
	<i>B. lentus</i>	0	0	0	0	0	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³	-	-
	<i>B. pseudomycoides</i>	10 ⁵ -10 ⁸	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³	10 ⁴ -10 ⁵	10 ² -10 ³	10 ³ -10 ⁵	10 ³ -10 ⁴	-	-
р. Сазанка	<i>B. pseudomycoides</i>	10 ⁵ -10 ⁸	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³	10 ⁶ -10 ⁷	10 ² -10 ³	10 ⁵ -10 ⁶	10 ² -10 ³	-	-
	<i>C. amalonicus</i>	0	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-
р. Курдюм	<i>B. amyloliquefaciens</i>	0	-	-	10 ⁴ -10 ⁶	10 ² -10 ³	-	-	0	0
	<i>B. megaterium</i>	0	-	-	0	0	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²
	<i>B. pseudomycoides</i>	10 ⁶ -10 ⁷	-	-	10 ³ -10 ⁵	10 ² -10 ⁴	-	-	10 ³ -10 ⁴	10 ² -10 ³
	<i>E. asburiae</i>	0	-	-	-	-	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²

Таблица 4 — Количественные показатели бактерий в пробах, отобранных в озере Сазанка

Виды бактерий	Вода КОЕ/мл	Рдест произ.		Рдест блест.		Рогоз обыкн.		Тростник обыкн.	
		эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г	эпиф КОЕ/см ²	эндо КОЕ/г
<i>B. amyloliquefaciens</i>	10 ³ -10 ⁵	0	0	-	-	10 ⁴ -10 ⁶	10 ¹ -10 ²	-	-
<i>B. megaterium</i>	0	0	0	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-
<i>B. pseudomycoides</i>	10 ⁸ -10 ¹⁰	10 ³ -10 ⁵	10 ² -10 ³	-	-	10 ⁴ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁴	-	-
<i>B. psychrotolerans</i>	0	0	0	-	-	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-
<i>S. sciuri</i>	10 ³ -10 ⁵	10 ² -10 ³	10 ¹ -10 ²	-	-	0	0	-	-

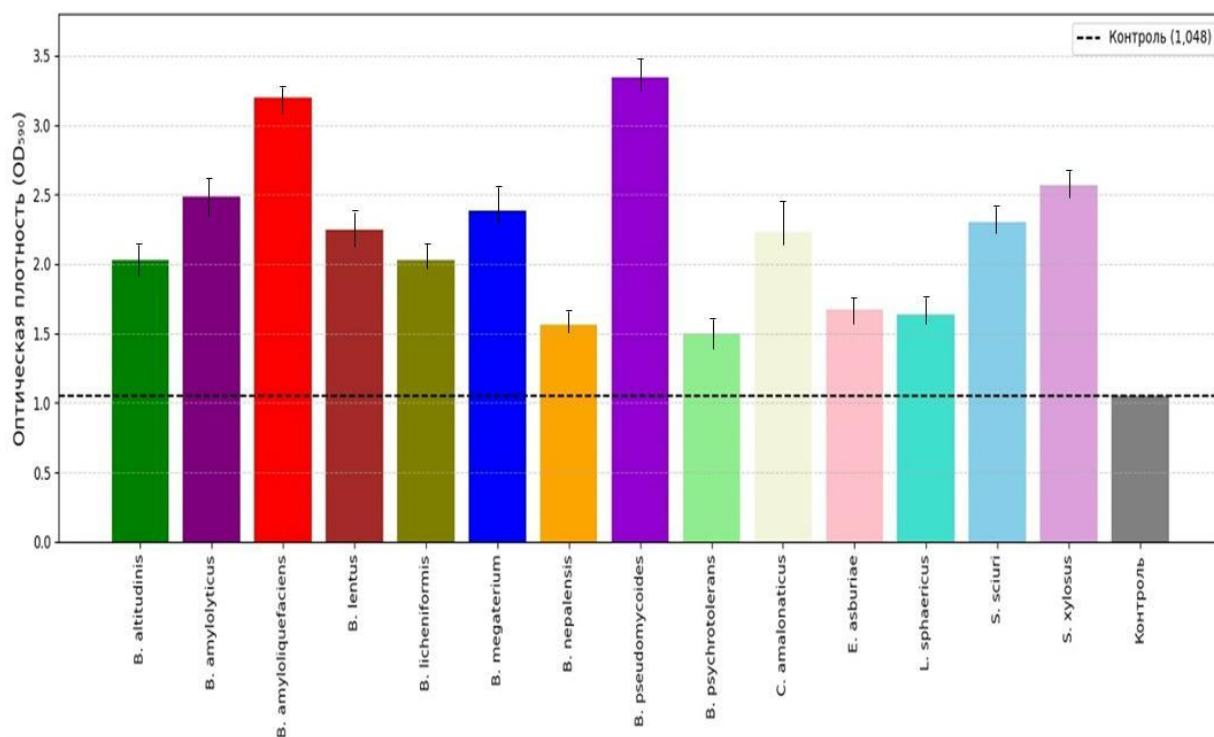


Рисунок 1 — Способность исследуемых бактерий к образованию биопленок

Кластерный анализ показал, что наибольшее сходство видового состава наблюдается между эндофитами и эпифитами погружённых макрофитов (рдестов) с бактериопланктоном, что указывает на прямую зависимость микробиоты погружённых растений от сообщества воды (таблица 6) [2, 3]. Наземно-водные макрофиты (рогоз, тростник) формируют более автономные бактериальные сообщества.

Таблица 5 — Индекс общности видового состава микроорганизмов воды и макрофитов в различных точках отбора

	Увек	Хим	Меч	о. Саз	р. Саз	Прист	Курд	з. Курд	Саб
Вода – рдест пронзеннолистный	1,0	0	0,50	0,25	0,50	1,0	0	0,67	0
Вода – рдест блестящий	0	0	1,0	0	0,50	0	0	0	0
Вода – рогоз обыкновенный	0	0,33	0,33	0,50	0,50	0,50	0,33	0,67	0
Вода – тростник обыкновенный	0	0	0	0,33	0	1,0	0,33	0,67	0,50

Таблица 6 — Сравнение эпифитной и эндофитной микробиоты исследованных макрофитов (по индексу общности видов Жаккара)

Вид макрофита	ИОВ	Интерпретация
Рдест пронзеннолистный	0,67	Высокое сходство – активный переход эпифитов в эндофиты
Рдест блестящий	0,50	Умеренное сходство – частичный переход
Рогоз обыкновенный	0,40	Умеренное сходство
Тростник обыкновенный	0,33	Низкое сходство – переход выражен слабо

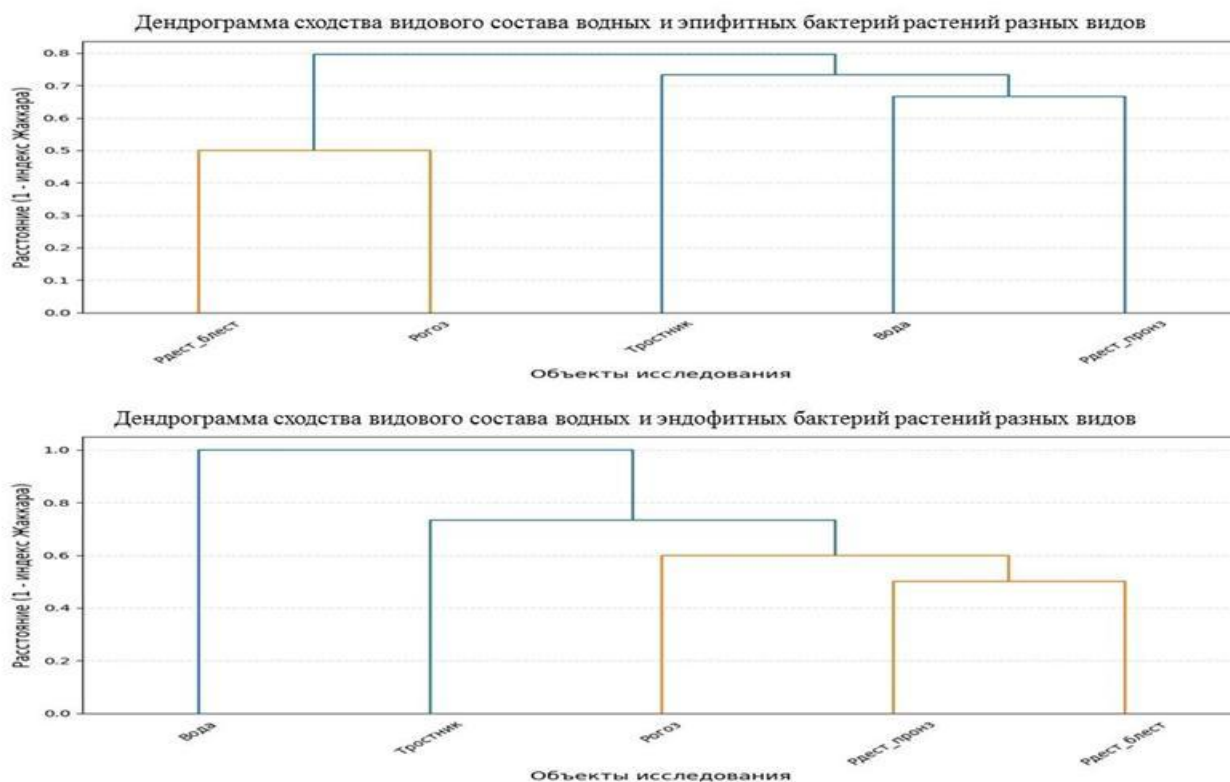


Рисунок 2 — Дендрограмма различий видового состава водных бактерий и бактерий-ассоциантов макрофитов

Заключение. Проведённое исследование вносит вклад в понимание структурно-функциональной организации макрофитно-бактериальных ассоциаций. Показано, что доминирование *B. pseudomycooides* (100% встречаемости) и высокая численность бактериопланктона (10^6 – 10^{10} КОЕ/мл) служат микробиологическими маркерами полисапробной зоны и замедленным водообменом в точках отбора (Курдюмский залив, р. Мечетка) [3, 4]. Эпифитная микробиота погружённых макрофитов формируется в значительной степени за счёт бактериопланктона, тогда как у наземно-водных растений она более автономна [1, 6] вследствие меньшего прямого контакта с водой и преобладания других источников бактерий (воздух, почва). Мацерирующая активность *B. pseudomycooides* указывает на потенциальную фитопатогенную опасность, что ограничивает его применение в открытых экосистемах.

Выводы. Анализ полученных нами в работе результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В макрофитно-бактериальных ассоциациях тростника обыкновенного, рогоза обыкновенного, рдеста пронзеннолистного, рдеста блестящего выявлено 14 видов микроорганизмов, принадлежащих к 3 родам грамположительных бактерий (*Bacillus*, *Lysinibacillus*, *Staphylococcus*), 2 родам граммотрицательных бактерий (*Citrobacter*, *Enterobacter*). Доминирующими видами бактерий были *B. pseudomycooides* (индекс встречаемости 100%) и *B. amyloliquefaciens* (индекс встречаемости 67–80%).

2. По результатам сравнительного анализа бактериопланктона, эпифитной и эндофитной микробиоты наибольшей колонизационной активностью обладают виды *B. pseudomycooides* и *B. amyloliquefaciens*.

3. Концентрация бактериопланктона в местах отбора проб составила 10^6 - 10^{10} КОЕ/мл, что указывает на сильную загрязненность водоема (полисапробная зона).

4. У эпифитных микроорганизмов макрофитов выявлена способность к биоплёнкообразованию, что указывает на их потенциальную роль в формировании стабильных микробных ассоциаций на поверхности растений. Максимальной биопленкообразующей способностью обладали *B. pseudomycooides* (высокий уровень) и *B. amyloliquefaciens* (высокий).

5. Сравнительный анализ эпифитной и эндофитной микробиоты макрофитов показал, что эпифитные бактерии характеризуются большим видовым разнообразием (на 2-4 порядка). Эндофитная микробиота представлена преимущественно теми же родами, что и эпифитная, что свидетельствует о проникновении бактерий из поверхностного сообщества во внутренние ткани растений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Остроумов, С. А. Биогенная самоочистка водных экосистем: роль макрофитов и микроорганизмов / С. А. Остроумов, Е. В. Соломонова // Биология внутренних вод. – 2020. – № 4. – С. 323–332.

2 Chen, Y. Bacterial communities associated with submerged macrophytes: diversity, functions and driving factors / Y. Chen, X. Li, W. Zhang // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 758. – Art. 143642. – P. 1–12.

3 Устинова, Г. М. Характеристика макрофитно-бактериальных взаимоотношений в водных биоценозах: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Г. М. Устинова. – Оренбург, 2004. – 22 с.

4 Плеханов, А. Ю. Бактериальный индекс загрязнения водных объектов: сравнительный анализ подходов / А. Ю. Плеханов, О. В. Середа // Гигиена и санитария. – 2020. – Т. 99, № 8. – С. 812–818.

5 Kuznetsova, M. V. Macrophyte-associated bacteria as indicators of eutrophication in reservoirs of the Lower Volga basin / M. V. Kuznetsova, D. S. Volkov, E. P. Alexandrova // Ecological Indicators. – 2023. – Vol. 148. – P. 1–10.

6 Petrova, O. A. Biofilm formation by *Bacillus cereus* strains isolated from freshwater environments / O. A. Petrova, A. V. Sinitsyn // Biofouling. – 2022. – Vol. 38, No 4. – P. 356–367.

7 Кравченко, О. Е. Биоплёнкообразование у бактерий рода *Bacillus*: генетические и экологические аспекты / О. Е. Кравченко, И. А. Новикова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 138–147.