

Оригинальная статья

УДК 579.2

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-399-409>

МНОГОЛЕТНИЕ РАЗРАСТАНИЯ НА КАМЕНИСТОМ СУБСТРАТЕ

Т. Я. Ашихмина^{1, 2✉}, Л. И. Домрачева^{2, 3}, А. И. Коротких³,
Л. В. Кондакова¹, С. Г. Скугорева², А. И. Фокина¹

¹ Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

² Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН

Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

³ Вятский государственный агротехнологический университет

Россия, 610017, г. Киров, Октябрьский просп., д. 133

Поступила в редакцию 09.02.2024 г., после доработки 26.04.2024 г., принята 26.04.2024 г., опубликована 17.12.2024 г.

Аннотация. Многовидовые цианобактериальные сообщества (био пленки, феномен «цветение») могут постоянно развиваться и длительно вегетировать на различных плотных средах, включая почву и каменистые субстраты. Эти сообщества представляют интерес как в теоретическом, так и практическом планах. Специфические особенности биопленок связаны с тем, что помимо фототрофов (водорослей и цианобактерий), в их состав входят гетеротрофные бактерии, микромицеты, простейшие, коловратки, т. е. в подобных микробоценозах наблюдается классическая трофическая сеть, дающая возможность существовать подобным консорциумам длительное время, в первую очередь, из-за способности цианобактерий к автотрофному питанию по углероду (фотосинтез) и по азоту (азотфиксация), что обеспечивает их устойчивость не только в стабильных условиях среды, но и при стрессовых ситуациях. С практической точки зрения цианобактериальные биопленки могут найти применение в биотехнологии в таких направлениях, как биосорбция, синтез экзометаболитов различной направленности. Кроме того, они могут быть полезны в связи с эксплуатацией различных построек из материала, аналогичного тому, который служил субстратом произрастания микроорганизмов в нашем эксперименте. Исследуемые биопленки в течение 15 лет поддерживались в модельном опыте на каменистом субстрате. Проведенные анализы по определению качественного и количественного состава фототрофного компонента биопленок, антифузариозной активности, определения содержания пигментов и концентрации тяжелых металлов показали, что для разрастаний характерны не только морфологические различия, но и существенные различия определяемых показателей в зависимости от характера роста. В пределах данного каменистого субстрата было выделено три различных типа биопленок и особые разрастания на стенках контейнера, в котором происходило культивирование.

Ключевые слова: алгоцианобактериальный консорциум, биопленки, антифузариозная активность, фотосинтетические пигменты, тяжелые металлы

✉ Для корреспонденции. Лаборатория биомониторинга Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

ORCID и e-mail адреса: Ашихмина Тамара Яковлевна: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, usr08619@vyatsu.ru; Домрачева Людмила Ивановна: <https://orcid.org/0000-0002-7104-3337>, dli-alga@mail.ru; Коротких Анастасия Игоревна: <https://orcid.org/0000-0002-0700-371X>, nastya-malinina1997@mail.ru; Кондакова Любовь Владимировна: <https://orcid.org/0000-0002-2190-686X>, usr11521@vyatsu.ru; Скугорева Светлана Геннадьевна: <https://orcid.org/0000-0002-5902-5187>, skugoreva@mail.ru; Фокина Анна Ивановна: <https://orcid.org/0000-0001-8265-8882>, annushka-fokina@mail.ru.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» (государственная регистрация в ЕГИСУ № 122040100032-5).

Соблюдение этических норм. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ашихмина Т. Я., Домрачева Л. И., Коротких А. И., Кондакова Л. В., Скугорева С. Г., Фокина А. И. Многолетние разрастания на каменистом субстрате // Поволжский экологический журнал. 2024. № 4. С. 399 – 409. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-399-409>

ВВЕДЕНИЕ

С первичным появлением автотрофных микроорганизмов на нашей планете связывают начальный этап накопления кислорода в атмосфере и протекание почвообразовательного процесса после выхода организмов на сушу (Заварзин, Крылов, 1983; Панкратова, Трефилова, 2007). В первую очередь, такая способность присуща цианобактериям, которые, помимо автотрофии по углероду (фотосинтез), обладают автотрофией по азоту (азотфиксация) и легко вступают в различные типы симбиотических связей с другими микроорганизмами, включая водоросли, гетеротрофные бактерии, микромицеты, простейшие (Домрачева, 2005). Формирующиеся макроскопические сообщества с доминированием цианобактерий, получившие название «биопленки» или феномен «цветения», интересны не только в теоретическом плане, но в перспективе могут иметь большой биотехнологический потенциал для производства разнообразных целевых продуктов (Пиневиц и др., 2018). С этой целью интересен отбор предназначенных для биотестирования на определенные свойства природных биопленок из различных местообитаний, включая биотопы с экстремальными условиями.

Пройдя миллиарды лет эволюции, цианобактерии сохранили способность не только выживать в различных средах обитания, но и завоевывать субстраты, недоступные для других организмов, в частности, каменные породы различного происхождения от твердого гранита до пористых гипсовых, известняковых и песчаниковых скал (Bell et al., 1993; Schultz et al., 2000; Gorbushina, 2007; De Natale et al., 2020). Колонизация цианобактериями минерального субстрата обеспечивается наличием экзополисахаридного матрикса, который практически приклеивает клетки цианобактерий к твердой поверхности, препятствует их высыханию, обеспечивает относительное постоянство внутренней среды биопленок (Crispin, Gaylarde, 2005; Gorbushina, 2007; Rossi, De Phillipis, 2015).

Разрастания альгоцианобактериальных комплексов настолько разнообразны и масштабны, что выявление их систематической структуры и фитоценотической организации в условиях первичного освоения различного рода субстратов имеет огромное значение в плане изучения биоразнообразия микрофототрофов относительно экстремальных условий обитания, понимания механизмов освоения субстратов, выяснения путей становления и метаморфозов от инициальных, пионерных биогеоценозов до зрелых (Пивоварова и др., 2012).

Цель работы: определение качественного и количественного состава массовых многолетних разрастаний микрофототрофов на каменистом субстрате с выявлением пигментного состава, антифузариозной и сорбционной активности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследований стали разрастания фототрофных микроорганизмов на каменистом субстрате. Этот субстрат был найден вблизи железной дороги и заинтересовал тем, что на его поверхности имелись цветные налеты. Аналогичные налеты были отмечены на строениях, расположенных недалеко от железнодорожного полотна. Каменистый субстрат поместили в пластиковый контейнер с дистиллированной водой и оставили на свету. В течение 15 лет экспозиции происходило автономное развитие поверхностных микробных комплексов, при этом, кроме воды, в контейнер ничего не добавляли. Характер разрастаний, развивающихся в контейнере, был различных типов: 1) пузыри (условно цианобактериальные пузыри – ПЦБ), 2) плотные пленки (био пленки – БП), 3) био пленки с включениями мха – условно БПМ), 4) разрастания на стенках сосуда (пристенные био пленки – ПБП).

Для определения качественного и количественного состава разрастаний буриком площадью 1 см² были отобраны био пленки всех имеющихся типов разрастаний, пипеткой отбирали жидкость, омывающую каменистый субстрат.

Количественный учет цианобактерий и водорослей проводили методом микроскопирования на мазках (Заварзин, Крылов, 1983). Определение видового состава проводили в свежих культурах и при выращивании в жидкой питательной среде Громова № 6 без азота.

Для анализа содержания фотосинтетических пигментов разрастания с каменистого субстрата измельчали. Навеску массой 0.200 – 0.300 г заливали 5 мл 100% ацетона и фиксировали в кипящей водяной бане. Фиксированную пробу растирали в фарфоровой ступке с добавлением кварцевого песка под слоем ацетона. В целях предотвращения феофитинизации во время извлечения к ацетону добавляли небольшое количество карбоната кальция для нейтрализации кислот клеточного сока, а также сульфата натрия для обезвоживания пробы. Полученный экстракт фильтровали через стеклянный фильтр с помощью вакуумного насоса. Фильтрат переносили в мерную колбу объемом 25 мл, доводили до метки ацетоном.

Оптическую плотность раствора измеряли на спектрофотометре при длинах волн 662 нм (хлорофилл *a*), 644 нм (хлорофилл *b*) и 470 нм (каротиноиды) в кювете с толщиной слоя 1 см (Кудряшов и др., 2011). При смещении максимума поглощения хлорофилла *a* делали коррекцию на длины волн других пигментов. В качестве стандарта использовали 100%-ный ацетон. Повторность определения содержания пигментов трехкратная.

Для количественного определения тяжелых металлов (ТМ) использовали образцы био пленок, вырезанные буриком. Образцы озоляли и определяли содержание методом инверсионной вольтамперометрии по ГОСТ 33824-2016.

Антифузариозную активность выявляли путем помещения вырезанных дисков из всех вариантов площадью 1 см² на предварительно выращенный газон фитопатогенного гриба *Fusarium culmorum* с последующим измерением диаметра зон лизиса. В случае культуральной жидкости ее также вносили на газоны фитопатогена в количестве 0.1 мл. Все в 5-кратной повторности.

Статистическую обработку полученных результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA). Статистическую значимость различий средних величин оценивали по *t*-критерию Стьюдента (использовали гетероскедастический двусторонний тест ТТЕСТ из статистического пакета Microsoft Excel).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При определении видового состава в целом выявлено 9 видов цианобактерий и 6 видов зеленых водорослей (табл. 1). Однако в разных консорциумах видовой состав различается.

Таблица 1. Фототрофные микроорганизмы обрастания

Table 1. Phototrophic fouling microorganisms

№ / No.	Отдел, вид / Department, species	ПЦБ / CB	БП / B	БПМ / BMI	ПБП / WB	Ж-р / L-s
Cyanobacteria						
1	<i>Leptolyngbya angustissima</i> Anag. et Kom.	+	+	+	–	+
2	<i>L. frigida</i> (Fritsch) Anag. et Kom.	+	–	–	–	–
3	<i>L. fragilis</i> (Gom.) Anag. et Kom.	–	+	–	–	–
4	<i>L. foveolarum</i> (Rabenhorst ex Gom.) Anag. et Kom.	–	–	–	+	+
5	<i>L. notata</i> (Schmidle) Anag. et Kom.	–	–	+	+	+
6	<i>Nostoc linckia</i> Born. et Flah. f. <i>muscorum</i> (Ag.) Elenk.	+	+	+	–	–
7	<i>N. paludosum</i> Kütz.	+	–	+	+	–
8	<i>Phormidium autumnale</i> Gom.	–	+	–	–	–
9	<i>Ph. ambiguum</i> Gom.	–	–	+	–	–
Chlorophyta						
10	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	+	+	+	+	+
11	<i>Ch. minutissima</i> Fot et Novakova	–	+	+	+	+
12	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrang) Meneg.	–	–	+	+	+
13	<i>Chloroplana terricola</i> Hollerb.	–	–	+	–	–
14	<i>Scenedesmus acuminatus</i> (Lagerheim) Chodat	–	–	+	–	–
15	<i>S. quadricauda</i> Breb.	–	–	+	–	–
Всего		5	6	11	6	6

Примечание. ПЦБ – цианобактериальные пузыри, БП – биопленки, БПМ – биопленки с включениями мха, ПБП – пристенные биопленки, Ж-р – жидкость-раствор.

Note. CB – cyanobacterial bubbles, B – biofilms, BMI – biofilms with moss inclusions, WB – wall biofilms, L-s – liquid-solution.

В природном обрастании выявлено 15 видов микрофототрофов. Матриksom данного микробного сообщества являются гетероцистные цианобактерии, представители рода *Nostoc* (*N. linckia*, *N. paludosum*), за счет слизи, объединяющей все организмы в единый комплекс. Присутствующие нитчатые цианобактерии располагаются большей частью в поверхностных слоях комплекса: *Phormidium autumnale*, *Ph. ambiguum*, *Leptolyngbya angustissima*, *L. frigidum*, *L. fragile*, *L. foveolarum*, *L. notatum*. Данные виды широко распространены в почвах региона, обладают толерантностью к антропогенной нагрузке.

МНОГОЛЕТНИЕ РАЗРАСТАНИЯ НА КАМЕНИСТОМ СУБСТРАТЕ

Зеленые водоросли, населяющие данный комплекс, представлены видами-убиквистами, встречающимися как в почвенной, так и в водной средах. В биопленке с мхом выявлено наибольшее число видов, в основном за счет зеленых водорослей. Умеренное сходство обнаружено для вариантов 3, 4 и 5. Наиболее сходны варианты 4 и 5, для которых коэффициент Жаккара составил 41.7% (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты Жаккара, %

Table 2. Jaccard's coefficients, %

Вариант / Option	1	2	3	4	5
1		27.3	25.0	18.2	18.2
2	–		17.6	16.7	25.0
3	–	–		29.4	29.4
4	–	–	–		41.7
5	–	–	–	–	

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП, 5 – жидкость-раствор.

Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms, 5 – liquid-solution.

Учет численности фототрофных микроорганизмов исследуемых биопленок показал очень высокую плотность развивающихся популяций во всех вариантах опыта с суммарной численностью клеток от 0.47×10^8 до 69.26×10^8 на cm^2 (табл. 3). При этом своего максимума по численности достигали разрастания в виде плотных пленок. Сравнительно небольшая плотность популяций характерна для разрастаний со мхом, где, вероятно, мох выступает в виде конкурента за пространство, и для популяций, развивающихся в водной среде.

Абсолютными лидерами по численности клеток всех изученных сообществ выступают цианобактерии, где их доминирование может превышать 90% (табл. 4), которые являются эдификаторами всех изученных консорциумов и основой их автономного длительного существования без внешней подпитки минеральными элементами (см. табл. 3). Существенное преобладание (более 90%) цианобактерий оказалось в вариантах «пленка» и «пузырь». В минимальном количестве в вариантах встречались зеленые водоросли.

Таблица 3. Численность фототрофных микроорганизмов (кл./ cm^2) в составе разрастаний на каменистом субстрате

Table 3. Numbers of phototrophic microorganisms (cells/ cm^2) in growths on a stony substrate

Вариант / Option	Численность, $\times 10^8$ / Number, $\times 10^8$		Общая численность фототрофов, $\times 10^8$ / Total numbers of phototrophs, $\times 10^8$
	Цианобактерии / Cyanobacteria	Зеленые водоросли / Green algae	
1	9.33 ± 1.00	0.97 ± 0.20	10.3
2	68.6 ± 11.5	0.66 ± 0.10	69.26
3	0.31 ± 0.10	0.16 ± 0.07	0.47
4	5.97 ± 0.32	3.10 ± 0.07	9.07
5	0.327 ± 0.28	0.113 ± 0.02	0.44

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП, 5 – жидкость-раствор.

Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms, 5 – liquid-solution.

Таблица 4. Соотношение численности (%) / видового разнообразия (%) фототрофных микроорганизмов в составе разрастаний на каменистом субстрате**Table 4.** Ratio of abundance (%) / species diversity (%) of phototrophic microorganisms in the composition of growths on a stony substrate

Вариант / Option	Цианобактерии / Cyanobacteria	Зеленые водоросли / Green algae
1	91.0/80.0	9.0/20.0
2	99.0/66.7	1.0/33.3
3	66.0/45.4	34.0/54.6
4	66.0/33.3	34.0/66.7
5	74.0/50.0	26.0/50.0

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП, 5 – жидкость-раствор.

Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms, 5 – liquid-solution.

приозной активности фототрофных микроорганизмов в составе разрастаний показал, что во всех вариантах присутствовали зоны лизиса, свидетельствующие о процессе подавления фитопатогенного гриба *Fusarium culmorum*. Наибольший литический эффект наблюдался в вариантах сообществ, развивающихся на стенках сосуда (4) и в цианобактериальном пузыре (1) (табл. 5).

В ходе анализа содержания фотосинтетических пигментов в разрастаниях получены данные, которые проиллюстрированы на рисунке. Наибольшее содержание хлорофиллов *a* и *b* определено в биопленках на стенках контейнера (4), в котором находился каменистый субстрат: 0.138 и 0.053 мг/г сырой массы соответственно. Несколько ниже было содержание хлорофиллов в биопленках на самом каменистом субстрате (2). В мохоподобных разрастаниях (3) концентрация всех

Таблица 5. Антифузариозная активность фототрофных разрастаний с камня**Table 5.** Antifusarium activity of the phototrophic growths from the stone

Вариант / Option	Зоны лизиса на газоне <i>Fusarium culmorum</i> , мм / Lysis zones on the <i>Fusarium culmorum</i> lawn, mm
1	7.8±2.0
2	3.8±0.8
3	3.4±0.5
4	12.4±2.0
5	3.6±0.2

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП, 5 – жидкость-раствор.

Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms, 5 – liquid-solution.

Постоянная регенерация альгоцианобактериальных сообществ обеспечивается наличием гетеротрофных микроорганизмов: коллатерал, микромицетов, бактерий, перерабатывающих и отмершие клетки, и продукты экзосмоса цианобактерий до минеральных солей и газов, которые постоянно используются вновь автотрофами, в первую очередь, цианобактериями вследствие их способности усваивать не только углекислый газ в процессе фотосинтеза, но и молекулярный азот в процессе азотфиксации.

Опыт по изучению антифузариозной активности фототрофных микроорганизмов в составе разрастаний показал, что во всех вариантах присутствовали зоны лизиса, свидетельствующие о процессе подавления фитопатогенного гриба *Fusarium culmorum*. Наибольший литический эффект наблюдался в вариантах сообществ, развивающихся на стенках сосуда (4) и в цианобактериальном пузыре (1) (табл. 5).

В ходе анализа содержания фотосинтетических пигментов в разрастаниях получены данные, которые проиллюстрированы на рисунке. Наибольшее содержание хлорофиллов *a* и *b* определено в биопленках на стенках контейнера (4), в котором находился каменистый субстрат: 0.138 и 0.053 мг/г сырой массы соответственно. Несколько ниже было содержание хлорофиллов в биопленках на самом каменистом субстрате (2). В мохоподобных разрастаниях (3) концентрация всех фотосинтетических пигментов была ниже, чем в биопленках. Минимальной концентрацией пигментов отличались пузыреподобные разрастания (1).

В результате определения ТМ в отобранном биоматериале установлено, что в большем количестве накопилось железо (табл. 6, 7). Соединения железа были заметны даже визуально, а после озоления биоматериала азотнокислая вытяжка имела характерный для ионов железа (III) цвет. При добавлении к азотнокислой вытяжке

раствора роданида калия (5%) вытяжка окрашивалась в кроваво-красный цвет, что указывало на наличие ионов железа (III). Анализ методом ИВА показал, что в большем количестве железо содержится в том материале, у которого площадь соприкосновения с субстратами (каменистый субстрат, стенка контейнера) была выше. Скорее всего, это обусловлено тем, что соединения железа (оксигидроксиды, гидроксиды, оксиды) лучше удерживаются в слоях, плотно прилегающих к субстратам (водоросли на стенках сосуда 4 и каменистого субстрата 2), чем в биоматериале (мох 3, пузырь 1), омываемом жидкостью.

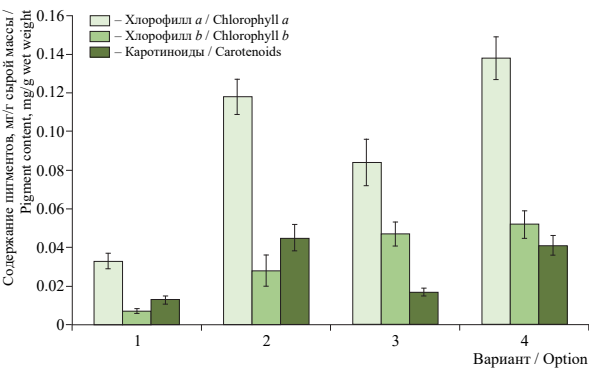
Во всех образцах обнаружены следовые количества свинца. В биопленке с камня не удалось обнаружить кадмий и медь. Незначительные количества меди и кадмия обнаружены в образцах со мхом и биопленке со стенки контейнера (см. табл. 6).

Таким образом, в ходе работы выявлены морфологические, структурные, антагонистические, биохимические особенности биопленок (см. табл. 7), которые показывают, что каждый исследуемый консорциум имеет специфические особенности.

Таблица 7. Морфологические и физиологические особенности биопленок, развивающихся на каменистом субстрате

Table 7. Morphological and physiological characteristics of the biofilms developing on the stony substrate

Показатель / Index	Вариант / Option			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
Общее число фототрофных видов / Total number of phototrophic species	5	6	11	6
Число видов цианобактерий / Number of cyanobacteria species	4	4	5	3
Число видов водорослей / Number of algae species	1	2	6	3



Содержание фотосинтетических пигментов в разрастаниях на каменистом субстрате: 1 – ПЦБ; 2 – БП; 3 – БПМ; 4 – ПБП

Figure. Content of photosynthetic pigments in the growths on the rocky substrate: 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms

Table 6. Content of heavy metals (µg/g) in the biomaterial selected from the stony substrate

Вариант / Option	Fe	Cd	Cu	Pb
1	12.0±0.6	–	–	Следы / Footprints
2	50±13	–	–	
3	11.0±0.6	6.9±2.5	3.8±1.3	
4	700±60	2.8±0.9	3.7±1.3	

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП.
Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms.

Окончание таблицы 7
Table 7. Continuation

1	2	3	4	5
Численность клеток фототрофов, $\times 10^8$ кл./см ² / Number of phototroph cells, $\times 10^8$ cells/cm ²	10.3	69.26	0.47	9.07
Содержание цианобактерий, % / Content of cyanobacteria, %	91	99	66	66
Антифузариозная активность (диаметр зоны лизиса, мм) Antifusarium activity (lysis zone diameter, mm)	7.8	3.8	3.4	12.4
Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/г сырой массы / Chlorophyll <i>a</i> content, mg/g wet weight	0.033	0.118	0.084	0.138
Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/г сырой массы / Chlorophyll <i>b</i> content, mg/g wet weight	0.007	0.028	0.047	0.052
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы / Carotenoid content, mg/g wet weight	0.013	0.045	0.017	0.041
Содержание железа, мкг/г / Iron content, μ g/g	12.0	50	11.0	700

Примечание. 1 – ПЦБ, 2 – БП, 3 – БПМ, 4 – ПБП; жирным шрифтом выделены максимальные значения.

Note. 1 – cyanobacterial bubbles, 2 – biofilms, 3 – biofilms with moss inclusions, 4 – wall biofilms; the maximum values are highlighted in bold.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все выявленные нами морфологические, структурные, антагонистические, биохимические особенности исследованных биопленок, отраженные в табл. 7, показывают, что каждый исследуемый консорциум имеет специфические особенности, что проявляется в характере доминирования отдельных показателей. При этом лидером по численности клеток фототрофов, доминированию цианобактерий, относительно высокому содержанию фотосинтетических пигментов и железа является плотная биопленка, занимающая большую часть поверхности каменистого субстрата. Биотехнологически значимые антагонистическая и антифузариозная активности характерны для пристенной биопленки, в которой также отмечается максимальное содержание пигментов и железа.

Сообщества, развивающиеся в одних условиях, имеют различные структурные и функциональные особенности, в первую очередь биопленки, сформировавшиеся на пластиковом сосуде, что, видимо, связано с характером трофических и аллопатических связей между фото- и гетеротрофными партнерами.

Таким образом, 4 типа биопленок, много лет существующих без внесения дополнительных питательных веществ, представляют собой модель возможных природных биопленок, обладающих способностью не только к длительному автономному существованию, но и к самовосстановлению и самосборке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Домрачева Л. И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2005. 336 с.

Заварзин Г. А., Крылов Н. Н. Цианобактериальные сообщества – колодец в прошлое // Природа. 1983. № 3. С. 59 – 68.

МНОГОЛЕТНИЕ РАЗРАСТАНИЯ НА КАМЕНИСТОМ СУБСТРАТЕ

Кудряшов А. П., Дитченко Т. И., Молчан О. В., Смолич И. И., Яковец О. Г. Физиология растений: лабораторный практикум для студентов биологического факультета. Минск: БГУ, 2011. 76 с.

Панкратова Е. М., Трефилова Л. В. Симбиоз как основа существования цианобактерий в естественных условиях и в конструируемых системах // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 1. С. 4 – 14.

Пивоварова Ж. Ф., Факторович Л. В., Благодатнова А. Г. Особенности таксономической структуры почвенных фотоавтотрофов при освоении первичных субстратов // Растительный мир Азиатской России. 2012. № 1 (9). С. 16 – 21.

Пиневич А. В., Коженкова Е. В., Аверина С. Г. Биопленки и другие прокариотные консорциумы. СПб.: Химиздат, 2018. 254 с.

Bell R. A. Cryptoendolithic algae of hot semiarid lands and deserts // Journal of Phycology. 1993. Vol. 29, iss. 2. P. 133 – 139. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1993.00133.x>

Crispin C., Gaylarde C. Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: A review // Microbial Ecology. 2005. Vol. 49, iss. 1. P. 1 – 9. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1052-5>

Gorbushina A. Life on the rocks // Environmental Microbiology. 2007. Vol. 9, iss. 7. P. 1613 – 1631. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x>

De Natale A., Mele B. H., Cennamo P., Del Mondo A., Petraretti M., Pollio A. Microbial biofilm community structure and composition on the lithic substrates of Herculaneum Suburban Baths // PLoS ONE. 2020. Vol. 15, iss. 5. Article number e0232512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232512>

Rossi F., De Phillipis R. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats // Life. 2015. Vol. 5, iss. 2. P. 1218 – 1238. <https://doi.org/10.3390/life5021218>

Schultz M., Porembski S., Budel B. Diversity of rock-inhabiting cyanobacterial lichens: Studies on granite inselbergs along the Orinoco and Guyana // Plant Biology. 2000. Vol. 2, iss. 4. P. 482 – 495. <https://doi.org/10.1055/s-2000-5951>

Permanent growth on a stony substrate

T. Ya. Ashikhmina^{1,2✉}, L. I. Domracheva^{2,3}, A. I. Korotkikh³,
L. V. Kondakova¹, S. G. Skugoreva², A. I. Fokina¹

¹ Vyatka State University

36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia

² Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Republic of Komi 167982, Russia

³ Vyatka State Agrotechnological University

133 Oktyabrsky Pros., Kirov 610017, Russia

Received: February 9, 2024 / revised: April 26, 2024 / accepted: April 26, 2024 / published: December 17, 2024

Abstract. Multispecies cyanobacterial communities (biofilms, the “blooming” phenomenon) may constantly develop and vegetate for a long time on various dense media, including soil and stony substrates. These communities are of interest both theoretically and practically. Some specific features of such biofilms are due to the fact that in addition to phototrophs (algae and cyanobacteria), they include heterotrophic bacteria, micromycetes, protozoa, rotifers. I.e., a classical trophic network is observed in such microbial cenoses, which makes it possible for such consortia to exist for a long time, primarily due to the ability of cyanobacteria to autotrophic nutrition in terms of carbon (photosynthesis) and nitrogen (nitrogen fixation), which ensures their stability not only in stable environmental conditions, but also in stressful situations. From a practical viewpoint, cyanobacterial biofilms could find application in biotechnology in such areas as biosorption and the synthesis of exometabolites of various directions. In addition, they could be useful in connection with the operation of various buildings made of a material similar to that which served as a substrate for the growth of these microorganisms in our experiment. The studied biofilms were maintained for 15 years in a model experiment on a stony substrate. Our analyzes carried out to determine the qualitative and quantitative composition of the phototrophic component of these biofilms, their antifusarium activity, the content of pigments and the concentration of heavy metals showed that the growths were characterized not only by morphological differences, but also by significant differences in the determined indicators depending on the nature of growth. Within this stony substrate, three different types of biofilms and specific growths on the walls of the container which the cultivation took place in were identified.

Keywords: algal-cyanobacterial consortium, biofilms, antifusarium activity, photosynthetic pigments, heavy metals

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the theme “Structure and Condition of Components of Anthropogenic Ecosystems of the Southern Taiga Subzone” (state registration in EGISU No. 122040100032-5).

✉ *Corresponding author.* Laboratory Biomonitoring of Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Tamara Ya. Ashikhmina: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, usr08619@vyatsu.ru; Lyudmila I. Domracheva: <https://orcid.org/0000-0002-7104-3337>, dli-alga@mail.ru; Anastasia I. Korotkikh: <https://orcid.org/0000-0002-0700-371X>, nastya-malinina1997@mail.ru; Liubov V. Kondakova: <https://orcid.org/0000-0002-2190-686X>, usr11521@vyatsu.ru; Svetlana G. Skugoreva: <https://orcid.org/0000-0002-5902-5187>, skugoreva@mail.ru; Anna I. Fokina: <https://orcid.org/0000-0001-8265-8882>, annushka-fokina@mail.ru.

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Ashikhmina T. Ya., Domracheva L. I., Korotkikh A. I., Kondakova L. V., Skugoreva S. G., Fokina A. I. Permanent growth on a stony substrate. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2024, no. 4, pp. 399–409 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-399-409>

REFERENCES

- Domracheva L. I. “*Tsveteniye*” *pochvy i zakonmernosti yego razvitiya* [“Blooming” of the Soil and Patterns of its Development]. Syktyvkar, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 336 p. (in Russian).
- Zavarzin G. A., Krylov N. N. Cyanobacterial communities – a well into the past. *Priroda*, 1983, no. 3, pp. 59–68 (in Russian).
- Kudryashov A. P., Ditchenko T. I., Molchan O. V., Smolich I. I., Yakovets O. G. *Fiziologiya rasteniy: laboratornyy praktikum dlya studentov biologicheskogo fakul'teta* [Plant Physiology: Laboratory Workshop for Students of the Faculty of Biology]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2011. 76 p. (in Russian).
- Pankratova E. M., Trefilova L. V. Symbiosis as the basis for the existence of cyanobacteria in natural conditions and in constructed systems. *Theoretical and Applied Ecology*, 2007, no. 1, pp. 4–14 (in Russian).
- Pivovarova J. F., Factorovich L. V., Blagodatnova A. G. Features of the taxonomic structures of soil photoautotrophs at development of primary substrate. *Flora and Vegetation of Asian Russia*, 2012, no. 1 (9), pp. 16–21 (in Russian).
- Pinevich A. V., Kozhenkova E. V., Averina S. G. *Bioplenki i drugiye prokariotnyye konsortsiy* [Biofilms and Other Prokaryotic Consortia]. St. Petersburg, Khimizdat, 2018. 254 p. (in Russian).
- Bell R. A. Cryptoendolithic algae of hot semiarid lands and deserts. *Journal of Phycology*, 1993, vol. 29, iss. 2, pp. 133–139. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1993.00133.x>
- Crispin C., Gaylarde C. Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: A review. *Microbial Ecology*, 2005, vol. 49, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1052-5>
- Gorbushina A. Life on the rocks. *Environmental Microbiology*, 2007, vol. 9, iss. 7, pp. 1613–1631. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x>
- De Natale A., Mele B. H., Cennamo P., Del Mondo A., Petraretti M., Pollio A. Microbial biofilm community structure and composition on the lithic substrates of Herculaneum Suburban Baths. *PLoS ONE*, 2020, vol. 15, iss. 5, article no. e0232512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232512>
- Rossi F., De Phillipis R. Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats. *Life*, 2015, vol. 5, iss. 2, pp. 1218–1238. <https://doi.org/10.3390/life5021218>
- Schultz M., Porembski S., Budel B. Diversity of rock-inhabiting cyanobacterial lichens: Studies on granite inselbergs along the Orinoco and Guyana. *Plant Biology*, 2000, vol. 2, iss. 4, pp. 482–495. <https://doi.org/10.1055/s-2000-5951>