

Биоразнообразие эпифитных цианобактерий и водорослей в условиях автотранспортного загрязнения г. Уфы

Biodiversity of epiphytic cyanobacteria and algae in conditions of road pollution in Ufa

Дубовик И. Е., Шарипова М. Ю.

Dubovik I. E., Sharipova M. Yu.

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия. E-mail: dubovikie@mail.ru; sharipovamy@mail.ru
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Реферат. Проведены исследования эпифитных цианобактериально-водорослевых ценозов вдоль автомагистралей г. Уфы на коре пяти видов древесных растений: лиственных (*Betula verrucosa* Ehrh., *Populus nigra* L., *Tilia cordata* Mill., *Sorbus aucuparia* L.) и хвойных (*Picea obovata* Ledeb.). Выявлено большое видовое разнообразие альгоэпифитов из 5 отделов, 7 классов, 12 порядков, 30 семейств, 48 родов и 85 видовых и внутривидовых таксонов. Доминировали эпифиты отделов Chlorophyta и Cyanobacteria (41 и 38 видовых и внутривидовых таксонов соответственно), ведущие семейства – Oscillatoriaceae и Chlorococcaceae, роды – *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Nostoc*, *Chlorococcum*. Проведенный экологический анализ позволил выявить шесть морфотипов. Показано преобладание колониально-коккоидных водорослей, которые составили 31 таксон (36,5 % от общего числа). Трихальные формы занимают второе место – 26 видов (30,6 %), коккоидных неподвижных – 22 вида (25,9 %). Спектр экобиоморф эпифитных цианопрокариот и водорослей включал 11 жизненных форм: Ch32P16C11CF6aer6H4X4P F3hydr1B1amph1. Наибольшая видовая представленность у олигоатмофитов – 77 % мезоатмофитов – 17 %, резко обеднена группа полиатмофитов – 6 %. Сравнение полученных результатов с контролем в экологически чистых местообитаниях не показало отличия в таксономическом и экологическом составе цианобактериально-водорослевых разрастаний, количестве живых клеток.

Ключевые слова. Автотранспортное загрязнение, кора деревьев, эпифитные цианобактерии и водоросли.

Summary. Studies of epiphytic cyanobacterial-algal cenoses along the highways of Ufa were carried out on five species of woody plants: deciduous (*Betula verrucosa* Ehrh., *Populus nigra* L., *Tilia cordata* Mill., *Sorbus aucuparia* L.) and coniferous (*Picea obovata* Ledeb.). A large species diversity of algaepiphytes from 5 divisions, 7 classes, 12 orders, 30 families, 48 genera and 85 species and intraspecific taxa was revealed. Epiphytes of the divisions Chlorophyta and Cyanobacteria dominated (41 and 38 species and intraspecific taxa, respectively), leading families – Oscillatoriaceae and Chlorococcaceae, genera – *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Nostoc*, *Chlorococcum*.

The ecological analysis made it possible to identify six morphotypes. The predominance of colonial-coccoid algae was shown, which made up 31 taxa (36.5 % of the total). Trichal forms take the second place – 26 species (30.6 %), coccoid immobile – 22 species (25.9 %). The spectrum of ecobiomorphs of epiphytic cyanoprokaryotes and algae included 11 life forms: Ch32P16C11CF6aer6H4X4PF3hydr1B1amph1. Oligoatmophytes have the highest species representation – 77 %, mesoatmophytes – 17 %, the group of polyatmophytes is sharply depleted – 6 %. Comparison of the obtained results with the control in ecologically clean habitats showed no difference in the taxonomic and ecological composition of cyanobacterial-algal growths, the number of living cells.

Key words. Epiphytic cyanobacteria and algae, road pollution, tree barks.

В местах скопления автотранспорта наблюдается превышение ПДК по содержанию таких веществ как оксид углерода, диоксид азота, формальдегид, фенол, толуол, пыль. Компоненты природной среды: почва, снеговой покров, растительность, воздух – загрязнены тяжёлыми металлами, концентрация которых превышает природные фоновые содержания (Гос. доклад о состоянии ..., 2022).

Определенный интерес представляет изучение биоразнообразия эпифитных цианобактерий и водорослей, находящихся вблизи автомагистралей. В качестве объектов для исследований были выбраны пять наиболее распространённых в г. Уфе видов древесных растений, лиственных (береза повислая – *Betula verrucosa* Ehrh., тополь черный – *Populus nigra* L., липа сердцелистная – *Tilia cordata* Mill., рябина обыкновенная – *Sorbus aucuparia* L.) и хвойных (ель сибирская – *Picea obovata* Ledeb.).

Отбор проб коры форофита с заметными разрастаниями и идентификацию цианобактерий и водорослей проводили прямым микроскопированием (Шарипова, Дубовик, 2012) и после культивирования образцов в жидкой среде Громова №6 (Громов, Титова, 1983). Все цианобактерии и водоросли были идентифицированы с помощью светового микроскопа «Микмед-1» (максимальное увеличение без иммерсии – $\times 600$, с иммерсией – $\times 1350$). Определяли таксономическую принадлежность цианобактерий и водорослей и состав экобиоморф (жизненных форм). Экобиоморфы определяли по классификации Э. А. Штиной (Штина, Голлербах, 1976; Шарипова, Дубовик 2012). Для морфотипов использовали классификацию Ж. Ф. Пивоваровой и Л. В. Факторович (2001). Альгоэпифиты также группировали в зависимости от уровня влажности воздуха и субстрата (Егорова, 2006), рассматривая олиго-, мезо- и полиатмофиты.

Определение соотношения живых, мертвых и отмирающих клеток цианобактерий и водорослей осуществляли методом люминесцентного микроскопирования. Небольшой срез коры (1 см²) помещали в каплю воды на предметном стекле, накрывали покровным стеклом и изучали под люминесцентным микроскопом. Живые клетки водорослей имеют ярко-красную флуоресценцию. Особенно разнообразна гамма световых переходов у отмирающих водорослей. Изменение спектра свечения клеток водорослей от живых к мертвым проходят по следующим фазам: 1) ярко-красное; 2) тускло-бордовое или розово-красное; 3) оранжево-розовое; 4) голубовато-зеленое; 5) оливково-зеленое. Последние оттенки световой гаммы характерны для мертвых клеток. Промежуточные оттенки свечения характерны для различных степеней отмирания клеток. При микроскопировании препарата подсчитывали количество клеток альгоэпифитов с различными оттенками свечения в 10 полях зрения по периметру препарата. На основании проведенного подсчета определяли процентное соотношение различных категорий клеток водорослей в зависимости от их физиологического состояния (Садчиков, 2003).

Систематика цианобактерий и водорослей представлена в соответствии с AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2013).

Проведенные исследования позволили выявить довольно большое видовое разнообразие альгоэпифитов из 5 отделов, 7 классов, 12 порядков, 30 семейств, 48 родов и 85 видовых и внутривидовых таксонов (табл. 1). Наиболее разнообразно представлены отделы Chlorophyta и Cyanoprokaryota=Cyanobacteria (41 и 38 видовых и внутривидовых таксонов соответственно). Меньшую долю составляют отделы Bacillariophyta и Ochrophyta (3 и 2 соответственно). Отдел Charophyta представлен единичным таксоном (табл. 1).

Непосредственно у проезжей части абиотические факторы могут существенно отличаться от господствующих на прилегающей территории (усиленный поверхностный сток, сильное прогревание, слабое испарение, ночное освещение и др.). Отмечалось, что на расстоянии до 30 м с каждой стороны проезжей части могут создаваться особые микроклиматические условия (Клауснитцер, 1990).

Лидирующее положение по видовому разнообразию занимают семейства Oscillatoriaceae и Chlorococcaceae (11 и 8 видовых и внутривидовых таксонов соответственно). Остальные три ведущих семейства относятся к цианопрокариотам: Nostocaceae, Microcystaceae, Pseudanabaenaceae. Среднее число видов в роде 1,5. Наибольшую видовую насыщенность имеют такие роды, как *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Nostoc*, *Chlorococcum*.

Наибольшей встречаемостью (более 40 %) в пробах характеризовались типичные эпифитные представители: *Desmococcus olivaceus* (Persoon ex Acharius) J. R. Laundon, *Leptolyngbya foveolarum* (Gomont) Anagnostidis et Komárek, *Trentepohlia umbrina* (Kützing) Bornet, *Trebouxia arboricola* Puymaly, *Bracteacoccus minor* (Schmidle ex Chodat) Petrov, *Mychonaster homoshaera* (Skuja) Kalina et Punc., *Nostoc punctiforme* f. *populorum* (Geitl) Hollerb. Часто встречались *Nostoc muscorum* C. Agardh ex Bornet et Flahault, *Tetracystis aggregata* R. M. Brown et Bold, *Actinochloris sphaerica* Korschikov, *Chlorococcum infusioformis* (Schrank) Meneghini, *Stichococcus minor* Nägeli.

Следует отметить, что большинство из обнаруженных представителей эпифитных цианобактерий и водорослей представляли собой малочисленные изоляты, выделявшиеся однократно.

Проведенный анализ эпифитных цианопрокариот и водорослей вдоль автодорог позволил выявить шесть морфотипов. Показано преобладание колониально-коккоидных водорослей, которые составили 31 таксон (36,5 % от общего числа). Трихальные занимают второе место – 26 видов (30,6 %). Меньше количество коккоидных неподвижных – 22 вида (25,9 %).

Таблица 1

Таксономическая структура, пропорции флоры цианобактериально-водорослевых ценозов вдоль автомагистралей

Отдел	Число				
	классов	порядков	семейств	родов	видов, внутривидовых таксонов
Cyanoprokaryota	1	4	11	18	38
Chlorophyta	3	5	16	27	41
Charophyta	1	1	1	1	1
Ochrophyta	1	1	1	1	2
Bacillariophyta	1	1	1	2	3
Vcero	7	12	30	48	85

Таблица 2

Ведущие по числу видовых и внутривидовых таксонов семейства эпифитных цианобактерий и водорослей

Семейства	Число таксонов	% от общего числа таксонов	Роды	Число таксонов	% от общего числа таксонов
Oscillatoriaceae	11	13	<i>Phormidium</i>	5	6
Chlorococcaceae	8	9	<i>Leptolyngbya</i>	4	5
Nostocaceae	6	7	<i>Nostoc</i>	4	5
Microcystaceae	4	5	<i>Chlorococcum</i>	4	5
Pseudanabaenaceae	4	5			
Vcero	33	39	Vcero	21	21

Распределение эпифитных цианопрокариот и водорослей вдоль автодорог показало наличие 11 жизненных форм: Ch32P16C11CF6aer6H4X4PF3hydr1B1amph1. Преобладали представители Ch-формы, эти виды отличаются исключительной выносливостью к различным экстремальным условиям и обычно обозначаются как убиквисты (Шарипова, Дубовик, 2012). Их большое видовое разнообразие, как и нитевидных цианобактерий P- формы, устойчивых к засухе, вполне объяснимо для экстремальных мест обитания, какими являются участки коры древесных растений вдоль автомагистралей. Большое разнообразие одноклеточных представителей Ch-форм отмечалось ранее И. Н. Егоровой (2006) при изучении эпифитных цианобактерий и водорослей Прибайкалья.

По потребности эпифитных цианобактерий и водорослей в капельно-жидкой воде виды из придорожных насаждений, обнаруженные нами, можно объединить в олигоатмофиты, мезоатмофиты и полиатмофиты. Для удобства анализа соотношение можно описать в виде формулы с начальными буквами названия О, М, П. В данном случае формула выглядит следующим образом О66М15П4, из которой следует, что наибольшая видовая представленность у олигоатмофитов – 66 видов (77 % от общего числа видов), меньшее число мезоатмофитов – 15 (17 %), резко обеднена группа полиатмофитов – 4 (6 %). Такое соотношение явно указывает на недостаточно благоприятные макро- и мезоклиматические условия обитания эпифитных цианобактерий и водорослей, при которых более полно используют ресурсы среды представители, приспособленные к жизни в условиях сухости субстрата и довольно высокой освещённости. Группа олигоатмофитов представлена цианопрокариотами и водорослями родов *Leptolyngbya*, *Phormidium*, *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Bracteacoccus*, *Trentepohlia*, *Tetracystis*. Это типичные роды наземной альгофлоры (Алексахина, Штина, 1984; Егорова, 2006).

Значительная доля часто встречающихся видов, возможно, обусловлена за счёт элиминирования редких и случайных видов. Ранее указывалось, что явление «концентрации доминирования» при высоких уровнях антропогенного воздействия известно для микроорганизмов, находящихся в стрессовых условиях и отмечается многими исследователями (Марфенина, Иванова, 2009; Дубовик и др., 2018).

Таблица 3

Эколого-таксономическая характеристика эпифитных цианобактерий и водорослей

Порода форофита	Виды	Число видов цианобактерий и водорослей в		
		отделах	экобиоморфах	группах по отношению к влажности
<i>Populus nigra</i>	32	Chlor ₁₆ Cyan ₁₄ Ochr ₁ Char ₁	Ch ₁₃ P ₆ CF ₃ aer ₄ C ₃ H ₂ PF ₁	O ₁₉ M ₉ Π ₄
<i>Tilia cordata</i>	29	Chlor ₁₄ Cyan ₁₁ Ochr ₁ Bac ₃	Ch ₉ aer ₅ B ₄ C ₃ CF ₃ P ₂ H ₂ PF ₁	O ₁₇ M ₇ Π ₅
<i>Sorbus aucuparia</i>	22	Chlor ₁₁ Cyan ₉ Ochr ₂	Ch ₇ aer ₃ P ₂ C ₂ X ₂ H ₂ PF ₂ CF ₁ a mph ₁	O ₁₄ M ₄ Π ₄
<i>Picea obovata</i>	26	Chlor ₁₂ Cyan ₁₁ Ochr ₂ Char ₁	Ch ₉ aer ₃ P ₃ X ₃ C ₃ H ₂ CF ₂ PF ₁	O ₁₆ M ₇ Π ₃
<i>Betula verrucosa</i>	39	Chlor ₂₂ Cyan ₁₅ Ochr ₁ Bac ₁	Ch ₁₄ P ₇ H ₄ aer ₃ CF ₃ C ₃ X ₂ B ₁ hydr ₁ amph ₁	O ₂₅ M ₉ Π ₅

Проведенные исследования с использованием люминесцентной микроскопии позволили обнаружить живые клетки цианобактерий и водорослей во всех изученных образцах коры с заметными поверхностными разрастаниями (от 19 до 73 %) после хранения в сухом виде в течение 4-х месяцев (табл. 4). Самый высокий процент живых клеток цианобактерий и водорослей зафиксирован на тополе черном.

Таблица 4

Соотношение живых и мертвых альгоэпифитов на различных видах деревьев

Форофит	Живые клетки	Мертвые клетки	Отмирающие	Количество живых (%)
<i>Populus nigra</i>	51,5 ± 2,2	19,5 ± 0,8	9,3 ± 0,6	62
<i>Tilia cordata</i>	19,5 ± 1,4	16,5 ± 0,6	16 ± 0,9	37
<i>Sorbus aucuparia</i>	6,0 ± 0,3	18,9 ± 0,9	7,8 ± 0,5	19
<i>Picea obovata</i>	59 ± 2,5	26,2 ± 1,4	8,8 ± 0,1	63
<i>Betula verrucosa</i>	30,5 ± 1,6	23,5 ± 1,1	12,1 ± 0,8	35

В целом, в эпифитных ЦВЦ наибольшим видовым разнообразием обладает засухоустойчивая группа, наблюдается преимущественное развитие цианобактерий. В морфологической структуре высокая видовая представленность у колониально-коккоидных неподвижных цианопрокариот и водорослей, меньшая – у нитчатых. Лидирующее положение занимали представители Ch, C, CF, aer - форм.

Сравнение результатов исследования с полученными ранее в экологически чистых местообитаниях (Кузяхметов, 2007; Дубовик и др., 2017; Дубовик, Шарипова, 2020) не показало отличия в таксономическом и экологическом составе цианобактериально-водорослевых разрастаний, количестве живых клеток, что не позволяет рассматривать эпифитные цианобактерии и водоросли для биомониторинга атмосферного воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексахина Т. И., Штина Э. А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. – М.: Наука, 1984. – 149 с.
- Громов Б. В., Титова Н. Н. Коллекция культур водорослей лаборатории микробиологии биологического института Ленинградского университета // Межвузов. сб. – Ленинград, 1983. – С. 3–27.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 г. – М., 2022. – 676 с. URL: <https://gkecopoldnr.ru/21/12/2022/publication/ecology/>
- Дубовик И. Е., Проскурякова А. В., Шарипова М. Ю. Таксономический и экологический состав эпифитных и напочвенных цианопрокариотно-водорослевых макроскопических разрастаний г. Уфы // Вестник Нижневартского государственного университета, 2017. – № 1. – С. 6–12.
- Дубовик И. Е., Шарипова М. Ю. Флористические комплексы рекреационной зоны г. Уфы // Сб.: Актуальные вопросы биологии, географии, химии, безопасности жизнедеятельности и методики их преподавания. Матер. Всеросс. (с международным участием) науч.-практ. конф. – Ишим, 2020. – С. 65–67.
- Дубовик И. Е., Шарипова М. Ю., Климина И. П. Влияние аэротехногенных загрязнений на состав сообществ

эпифитных микромицетов г. Уфы // Вестник Пермского университета. Серия: Биология, 2018. – № 2. – С. 130–138.

Егорова И. Н. Эпифитная альгофлора Прибайкалья: видовое разнообразие и экологические особенности: Автореф. дис. ... канд. биол. н. – Улан-Удэ, 2006. – 19 с.

Клауснитцер Б. Экология городской фауны. – Москва: Мир, 1990. – 248 с.

Кузяхметов Г. Г. Ярусное распределение водорослей в лесных сообществах лесостепи Предуралья // Ботан. журн., 2007. – Т. 92, №4. – С. 469–477.

Марфенина О. Е., Иванова А. Е. Основные направления оценки антропогенных изменений структуры комплексов почвенных микроскопических грибов. Анализ итогов исследований // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Сборник материалов VII Междунар. конф. – Пермь, 2009. – С. 128–131.

Пивоварова Ж. Ф., Факторович Л. В. Почвенные водоросли пойменных субстратов континентальной дельты реки Шивилиг-Хем Убсунурской котловины Тувы // Сиб. экол. журн., 2001. – Т. VIII, № 4. – С. 435–441.

Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного планктона: Методическое руководство. – М.: Изд-во Университет и школа, 2003. – 157 с.

Шарипова М. Ю., Дубовик И. Е. Современные методы альгологии. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. – 116 с.

Штина Э. А. Голлербах М. М. Экология почвенных водорослей – М.: Наука, 1976. – 144 с.

Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase: World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2013. URL: <http://www.algaebase.org> (Accessed 20.11.2022.) DOI: 10.7872 / crya.v35.iss2.2014.105