Домрачева Л. И. , Кондакова Л. В. , Зыкова Ю. Н. , Ефремова В. А. ЦИАНОБАКТЕРИИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ // Принципы экологии. 2013. № 4. С. 10–27.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

http://ecopri.ru http://petrsu.ru

УДК УДК 831.466

ЦИАНОБАКТЕРИИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

ДОМРАЧЕВА Людмила Ивановна — *Вятская государственная сельскохозяйственная академия, dli-alga@mail.ru*

КОНДАКОВА Любовь Владимировна — *Вятский государственный гуманитарный университет, kaf_eco@vshu.kirov.ru*

ЗЫКОВА Юлия Николаевна — *Вятская государственная сельскохозяйственная академия, orewek7@rambler.ru*

ЕФРЕМОВА Виталина Александровна — *Вятский государственный гуманитарный университет, kaf_eco@vshu.kirov.ru*

Ключевые слова:
Почвенные цианобактерии
видовой состав
городские почвы
внутрипочвенные группировки
цианофитизации фототрофов
«цветение» почвы
альгоценозы

Аннотация:
Цианобактерии являются постоянным компонентом внутрипочвенных и наземных комплексов фототрофных микроорганизмов городских почв. В наземных разрастаниях при «цветении» почвы, включая феномен зимнего «цветения», именно эта группа организмов является доминирующей в различных зонах города (промышленной, транспортной, селитебной, парковой), оставляя на минорных позициях представителей эукариотных водорослей. Для цианобактерий характерно достаточно большое видовое разнообразие с преобладанием безгетероцистных форм и высокая плотность популяций (до нескольких десятков миллионов клеток на 1 см2). Цианофитизация фототрофных микробных комплексов является характерной особенностью городских почв.

© 2013 Петрозаводский государственный университет

Получена: 04 февраля 2014 года Опубликована: 26 марта 2014 года

Введение

Являясь космополитами, цианобактерии (ЦБ) заселяют практически все наземные биотопы, в том числе и городские почвы. При этом развитие микроорганизмов в урбаноземах происходит в специфических условиях, резко отличных от условий природных экосистем данного региона. Антропогенное воздействие на почву проявляется в неблагоприятных физических, химических и биологических процессах, приводящих к нарушению почвенного покрова, загрязнению, деградации.

Следовательно, формирование микробных комплексов, включая альго-цианобактериальные, в урбаноземах подчиняется воздействию не только и не столько природных факторов (влажность, температура, поток биогенных элементов), сколько мобилизации адаптационных возможностей организмов для выживания в среде, подверженной влиянию стресс-факторов. В результате формируются микробные комплексы и ценозы, обладающие рядом новоприобретенных признаков. Так, при изучении альгогруппировок урбоэкосистем, выполненном в ряде городов России: Уфа и другие города Башкортостана, Красноярск, Челябинск, Новосибирск, Новосибирский Академгородок, Ижевск, Петрозаводск (Кабиров, Суханова, 1996; Сугачкова, 1998; Хабуллина, 1998; Суханова и др., 2000;

Артамонова, 2010; Трухницкая, Чижевская, 2008; Дубовик, Климина, 2009; Аксёнова, 2010; Антипина, Комулайнен, 2010; Климина, 2011; Смирнова, 2013), выявлены их отличия от зональных. Например, было показано, что в различных урбанизированных биотопах формируются своеобразные комплексы, отличающиеся от зональных по видовому разнообразию, составу доминантов, сложности систематической структуры, численности и биомассе. В целом урбанизация обусловливает увеличение видового разнообразия почвенных водорослей за счет появления новых экологических ниш для их существования.

Изучение эпифитной флоры урбанизированной территории показало, что даже при высоком уровне аэротехногенного загрязнения сохраняется довольно высокое биоразнообразие эпифитных цианопрокариотно-водорослевых ценозов (Дубовик, Климина, 2010; Смирнова, 2013).

Цель данной работы – изучить закономерности развития почвенных цианобактериальных комплексов в различных функциональных зонах города.

Материалы

Объектами исследования были образцы почв и субстратов, отобранные в различных зонах г. Кирова: селитебной, транспортной, промышленной, рекреационной (рис. 1).

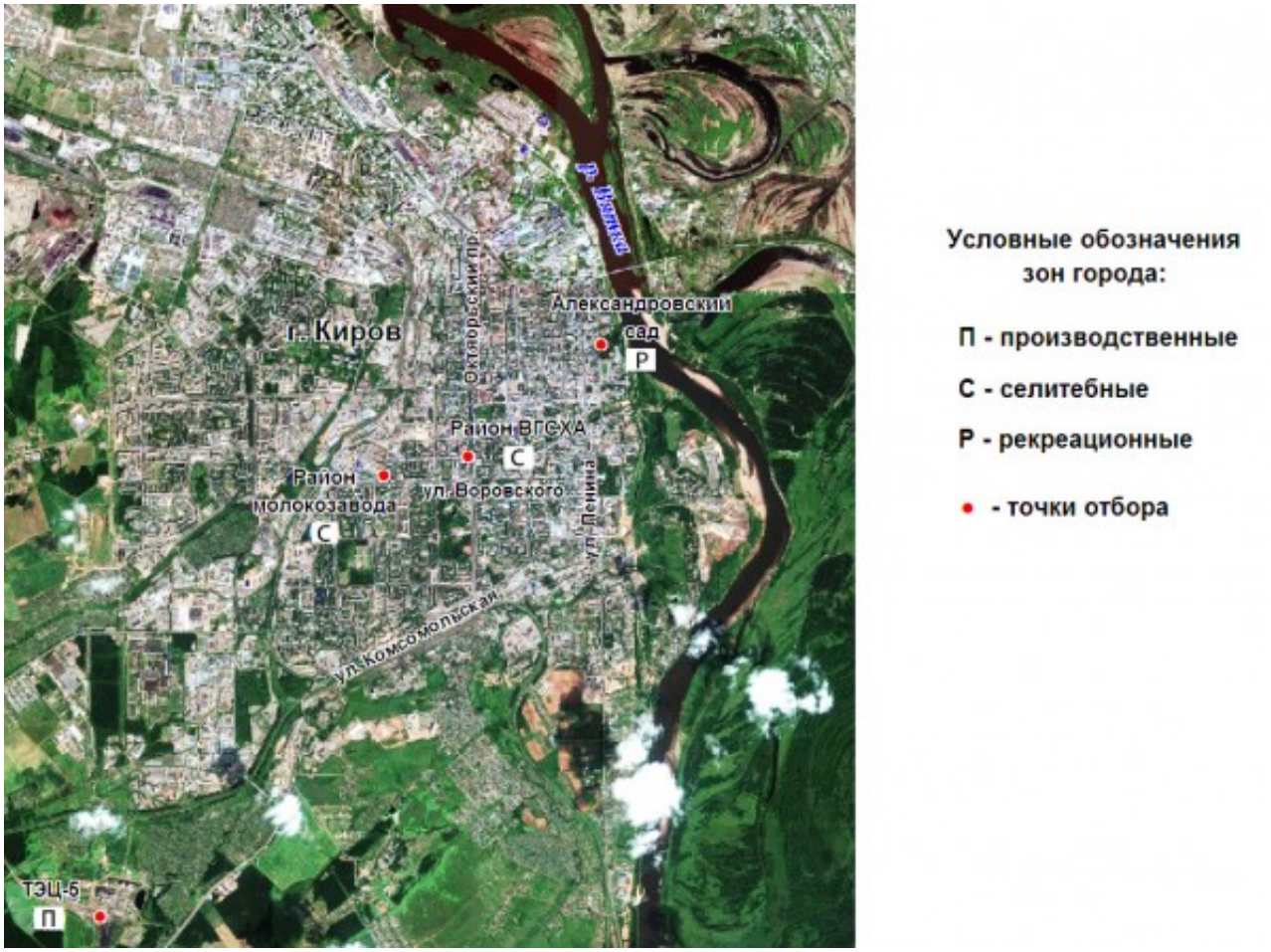

Рис. 1. Точки отбора образцов почв (г. Киров)
Fig. 1. Points of soil sampling (Kirov)

Город Киров относится к крупным промышленным городам с развитой инфраструктурой и населением более 500 тыс. человек. Естественный почвенный покров примыкающих к городу территорий представлен преимущественно дерново-подзолистыми суглинистыми и супесчаными почвами. На природный комплекс города оказывает сильное воздействие техногенная нагрузка. Модуль техногенной нагрузки территории г. Кирова оценивается в 100 тыс. т/км^2, что соответствует модулю таких крупных промышленных городов, как Казань, Нижний Новгород, Саранск и др. (Ашихмина, 2012). Исследования комплексного состояния территории г. Кирова показали, что 30 % ее находится в

удовлетворительном состоянии (в частности, сады и парки). Сильную антропогенную нагрузку испытывает более 27 % территории города (районы промышленных предприятий и ТЭЦ). Остальные территории испытывают среднюю антропогенную нагрузку. К основным загрязняющим веществам на территории города относятся диоксид серы, оксиды азота, ртуть и ее соединения, соединения свинца и других тяжелых металлов, нефть и нефтепродукты.

Отбор образцов для видового анализа и количественного учета водорослей и цианобактерий проводили по общепринятым методикам почвенной альгологии с глубины 0–5 см для изучения внутрипочвенных группировок фототрофов и пленки толщиной 0–2 мм при «цветении» почвы (Голлербах, Штина, 1969). Масса почвенных образцов из каждой зоны составляла не менее 1 кг. В дальнейшем для количественного анализа отбирали средние пробы по 10 г и фиксировали 4 % раствором формалина. Обычно в умеренной зоне отбор почвенных образцов для проведения альгологического анализа проводится в мае – октябре до выпадения снега. Наличие в последние годы аномально высокой температуры в зимний период позволяет легко проводить отбор почвенных образцов для выявления особенностей развития фототрофов в это время. Так, наше исследование было выполнено в конце ноября в условиях аномально теплой и бесснежной погоды, когда почва не промерзала очень долго.

Площадь отбираемых образцов «цветущей» почвы колебалась от 20 до 50 см^2. Для количественного анализа готовили среднюю пробу суммарной площадью 10 см^2 и проводили количественный учет водорослей и ЦБ в свежесобранных образцах.

Методы

Для определения видового состава водорослей и ЦБ использовали водные и почвенные со стеклами обрастания культуры (Штина, Голлербах, 1976).

Количественный учет фототрофов проводили методом прямого счета под микроскопом на мазках (увеличение окуляра х 15; объектива х 40); биомассу определяли объемно-расчетным методом (Домрачева, 2005). Для этого делаются навески по 10 г или площадью 10 см^2 (из смешанной средней пробы). Отобранный массив или растирается непосредственно в ступке, или разбивается в гомогенизаторе.

Почвенную суспензию с водорослями после растирания без потерь переносят в мерный цилиндр на 100 мл и доливают дистиллированной водой до метки. Мерный цилиндр закрывают резиновой пробкой, суспензию встряхивают 1–2 мин., производят отбор суспензии микропипеткой объемом 0.1 мл приблизительно на уровне 50 мл (на середине водного столба). Почвенную суспензию наносят на тщательно обезжиренное предметное стекло (0,01 мл на препарат) и равномерно микробиологической петлей распределяют на площади 4 см^2 (квадрат 2 х 2 см) по трафарету из бумаги, подложенному под стекло. Из одной пробы, т. е. варианта опыта, готовят 9 мазков на 3 предметных стеклах. Степень разведения может изменяться в зависимости от обилия водорослей в исходном образце. Чем меньше разведение, тем выше точность полученных результатов. Используемое разведение 1:10 – минимальное для всех известных случаев количественного учета водорослей. При традиционном способе практикуется разведение в 30–40 раз.

Количество клеток фототрофов определяется по формуле: $N = 4an/S*10^{10}$, где a – среднее число клеток в одном поле зрения; n – разведение; S – площадь поля зрения (мкм^2); 4 – площадь мазка (см^2). Это количество клеток содержится в 0,01 мл суспензии, которую наносили на препарат, следовательно, в 1 мл данной суспензии концентрация клеток в 100 раз больше.

Определение биомассы фототрофов в природных популяциях проводили одновременно с количественным учетом их клеток без использования усредненных показателей. С помощью окуляр-микрометра измеряли линейные размеры каждой встреченной клетки и рассчитывали ее объем, уподобляя форму клетки геометрическим телам. Удельная биомасса водорослей принималась равной единице. Биомассу на гектар вычисляли, исходя из веса пахотного горизонта в случае глубинных образцов или рассчитывая площадь покрытия почвы «цветением» для пленок.

На этих же мазках определяли длину грибного мицелия и длину нитей ЦБ в микрометрах, в дальнейшем переводя этот показатель в м/см^2 поверхности почвы.

Результаты

Видовой состав цианобактерий почв г. Кирова

В почвах г. Кирова методом чашечных культур выявлено 123 вида и разновидности водорослей и ЦБ (Кондакова, 2012). По видовому разнообразию преобладают ЦБ (43.1 %). Это более чем в 1.5 раза

выше видового разнообразия ЦБ в почвах фоновой территории ГПЗ «Нургуш» (табл. 1).

Таблица 1. Состав водорослей в городских почвах в сравнении со сводными данными по Кировской области и фоновой территорией (1 – число видов, 2 – процент от общего числа видов)

Объект	Cyanophyta		Chlorophyta		Xanthophyta + Eustigmatophyta		Bacillariophyta		Всего
	1	2	1	2	1	2	1	2	
г. Киров	53	43.1	41	33.3	16	13.0	12	9.7	123*
ГПЗ «Нургуш»	27	26.7	44	43.6	24	23.8	6	5.9	101
Сводные данные по Кировской области (Штина, 1997)	166	27.7	239	39.9	122	20.4	66	11.0	599*

* – встретились представители других отделов (представители отдела Euglenophyta).

Видовой состав цианофлоры городских почв различных зон представлен табл. 2.

Таблица 2. Видовое разнообразие почвенных цианобактерий в различных зонах города

№ п/п	Названия отделов и видов	Жизненная форма	Зоны города: Промыш-ленная	Транс-портная	Рекреа-ционная	Сели-тебная
1	2	3	4	5	6	7
	Cyanophyta					
1	Anabaena cylindrica Lemm. f. cylindrica	CF	+			
2	Anabaena oscillarioides Bory f. oscillarioides	CF	+			
3	Anabaena sphaerica Born. et Flah.	CF	+		+	+
4	Borzia trilocularis Cohn.	X				+
5	Calothrix elenkinii Kossinsk. f. elenkinii	CF	+		+	+
6	Cylindrospermum catenatum Ralfs	CF		+	+	
7	Cylindrospermum licheniforme (Bory) Kütz.	CF		+	+	+
8	Cylindrospermum michailovskoense Elenk.	CF			+	+
9	Cylindrospermum muscicola Elenk.	CF		+	+	
10	Leptolyngbya angustissimum (W. et G. S. West) Anagn. et Kom.	P	+			+
11	Leptolyngbya foveodarum (Rabenhorstex Gom.) Anagn. et Kom.	P	+	+	+	+
12	Leptolyngbya fragilis (Gom.) Anagn. et Kom.	P	+			
13	Leptolyngbya	P	+	+		+

	frigida (Fritsch) Anagn. et Kom.					
14	Microchaete tenera Thur. *f. tenera*	PF	+	+	+	
15	Microcoleus vaginatus (Vauch.) Gom.	M	+	+	+	+
16	Microcoleus vaginatus Gom. *f. monticola*	M				+
17	Nodullaria harveyana (Twait.) Thur.	CF			+	
18	Nostoc commune (Vauch.) *f. commune*	CF	+			
19	Nostoc linckia (Roth.) Born. et Flah	CF	+		+	
20	Nostoc muscorum (Ag.) Elenk.	CF	+	+	+	+
21	Nostoc paludosum Kütz.	CF	+	+	+	+
22	Nostoc punctiforme (Ag.) Elenk.	CF	+	+	+	+
23	Nostoc punctiforme (Ag.) Elenk. *f. populorum*	CF				+
24	Oscillatoria amoena (Kütz.) Grun.	hydr		+		
25	Phormidium aerugineo-coerulea (Gom.) Anagn. et Kom.	P	+	+		
26	Phormidium ambiguum Gom.	P		+		+
27	Phormidium angustissimum W. Et G. S. West	P	+			
28	Phormidium animale (Ag. ex Gom.) Anagn. et Kom.	P	+			
29	Phormidium autumnale (Ag.) Gom.	P	+	+	+	+
30	Phormidium boryanum Kütz.	P	+	+	+	+
31	Phormidium breve (Kütz. ex Gom.) Anagn. et Kom.	P	+	+	+	+
32	Phormidium corium (Ag.) Gom.					+
33	Phormidium formosum (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom.	P	+	+	+	+
34	Phormidium henningsii Lemm.	P		+		+
35	Phormidium interruptum Kütz.	P				+
36	Phormidium inundatum Kütz.	P	+			
37	Phormidium jadinianum Gom.	P		+		+

38	Phormidium molle (Kűtz.) Gom.	P		+		+
39	Phormidium retzii Lemm(Ag.) Gom. *f. retzii*	P				+
40	Phormidium splendidum (Grev. ex Gom.) Anagn. et Kom.	amph	+			
41	Phormidium tenue (Menegh.) Gom.	P				+
42	Phormidium uncinatum (Ag.) Gom.	P		+	+	+
43	Plectonema boryanum Gom. *f. boryanum*	P	+	+	+	
44	Plectonema nostocorum Born.	P	+			+
45	Plectonema notatum Schmidle	P	+		+	+
46	Pseudanabaena bipes Bocher	X		+		
47	Pseudanabaena catenata Lauterb.	X	+			+
48	Pseudanabaena galeata Bocher *f. galeata*	X	+		+	
49	Pseudanabaena tenuis Koppe	X		+		
50	Schizothrix friesii (Ag.) Gom.	M		+		
51	Scytonema ocellatum (Dillw) Thur.	PF	+			
52	Tolypothrix tenuis (Kütz.)	PF	+	+		+
53	Trichromus variabilis (Kütz. ex Born et Flah.) Kom. et Anagn.	CF	+		+	
	Всего видов		32	26	23	31

В целом по общему числу видов водорослей и ЦБ зоны г. Кирова имеют близкие значения (табл. 3).

Таблица 3. Видовой состав альгофлоры городских почв

Отделы	Промышленная зона	Транспортная зона	Селитебная зона	Рекреационная зона	Всего
Cyanophyta	32	26	31	23	53
Bacillariophyta	11	10	11	9	12
Xanthophyta	3	2	4	10	13
Eustigmatophyta	2	1	1	3	3
Chlorophyta	23	24	13	29	41
Euglenophyta	–	1	–	–	1
Всего	71	64	60	73	123

В изученных пробах промышленной зоны г. Кирова выявлен 71 вид почвенных водорослей и ЦБ (табл. 1), в том числе *Cyanophyta* – 32 вида (45.1 %), *Bacillariophyta* – 11 видов (15.5 %), *Xanthophyta* – 3 вида (4.2 %), *Eustigmatophyta* – 2 вида (2.8 %), *Chlorophyta* – 23 вида (32.4 %). По числу видов преобладают ЦБ и зеленые водоросли.

В состав доминирующего комплекса микрофотрофов входят цианобактерии: *Microcoleus vaginatus , Phormidium autumnale, Leptolyngbya foveolarum, Nostoc commune, Nostoc punctiforme.* Встречаемость

(60–100 %) на данных территориях имеют виды: *Phormidium autumnale, Leptolyngbya foveolarum, Microcoleus vaginatus.* Из 32 видов ЦБ данной зоны 13 видов представлены гетероцистными формами (табл. 2). Специфическими видами являются: *Anabaena cylindrica, A. oscillarioides, Leptolyngbya fragilis*, *Nostoc commune*, *Phormidium angustissimum*, *Ph. animale*, *Ph. inundatum*, *Ph. splendidum, Scytonema ocellatum*. Анализ цианофлоры по жизненным формам указывает на преобладание нитевидных безгетероцистных ЦБ, тяготеющих к голым участкам минеральной почвы и обладающих ксероморфной структурой. Формула экобиоморф цианобактерий P_{15} CF_{10} PF3 X_2 M_1 amph.

В пробах с транспортной зоны г. Кирова обнаружено 64 вида почвенных фототрофов (табл. 1), в том числе Cyanophyta – 26 видов (40.6 %), Bacillariophyta – 10 видов (15.6 %), Xanthophyta – 2 вида (3.1 %), Eustigmatophyta – 1 вид (1.6 %), Chlorophyta – 24 вида (37.5 %), Euglenophyta – 1 вид (1.6 %). Доминантами сообществ ЦБ транспортной зоны являются: *Microcoleus vaginatus, Ph. autumnale, Ph. formosum, Cylindrospermum licheniforme, Nostoc paludosum.* Специфические виды ЦБ транспортной зоны: *Oscillatoria amoena, Pseudanabaena bipes, Pseudanabaena tenuis*, *Schizothrix friesii*. В составе жизненных форм преобладают безгетероцистные цианобактерии P_{13} CF_6 PF_2 M_2 X_1.

В селитебной зоне г. Кирова обнаружено 60 видов почвенных фототрофов (табл. 1), в том числе Cyanophyta – 31 вид (51.7 %), Bacillariophyta – 11 видов (18.3 %), Xanthophyta – 4 вида (6.7 %), Eustigmatophyta – 1 вид (1.7 %), Chlorophyta – 13 видов (21.6 %). Доминирующий комплекс составили ЦБ – *Ph. autumnale, Ph. boryanum, Pseudanabena catenata, Microcoleus vaginatus, Nostoc paludosum.* Специфическими видами данной зоны являются*: Calothrix elenkinii, Phormidium corium, Ph. interruptum, Ph. tenue, Ph. retzii.*

Состав жизненных форм цианобактерий: P_{18} CF_8 X_2 M_2 PF_1.

При нарушении почвенного покрова разрастание цианобактерий способно формировать начальные стадии восстановительных сукцессий. По нашим наблюдениям это: *Ph. autumnale, Ph. uncinatum, Ph. boryanum, Microcoleus vaginatus,Schizothrix friesii, Leptolyngbya foveodarum, L. fragilis, Plectonema boryanum, Nostoc punctiforme, N. commune, Tolypothrix tenuis.*

В рекреационной зоне (городские парки) видовое разнообразие представлено 73 видами почвенных фототрофов (табл. 1), в том числе Cyanophyta – 22 вида (30.1 %), Bacillariophyta – 9 видов (12.3 %), Xanthophyta – 10 видов (13.7 %), Eustigmatophyta – 3 вида (4.1 %), Chlorophyta – 29 видов (39.7 %). По видовому разнообразию преобладают зеленые водоросли и ЦБ.

Доминирующий комплекс ЦБ представлен видами: *Leptolyngbya foveolarum, Microcoleus vaginatus, Ph. autumnale, Ph. boryanum, Ph formosum, Nostoc punctiforme*, *Cylindrospermum licheniforme, C. michailovskoense.* Встречаемость (более 50 %) имеют виды: *Phormidium boryanum, Leptolyngbya foveolarum, Microcoleus vaginatus* (рис. 2).

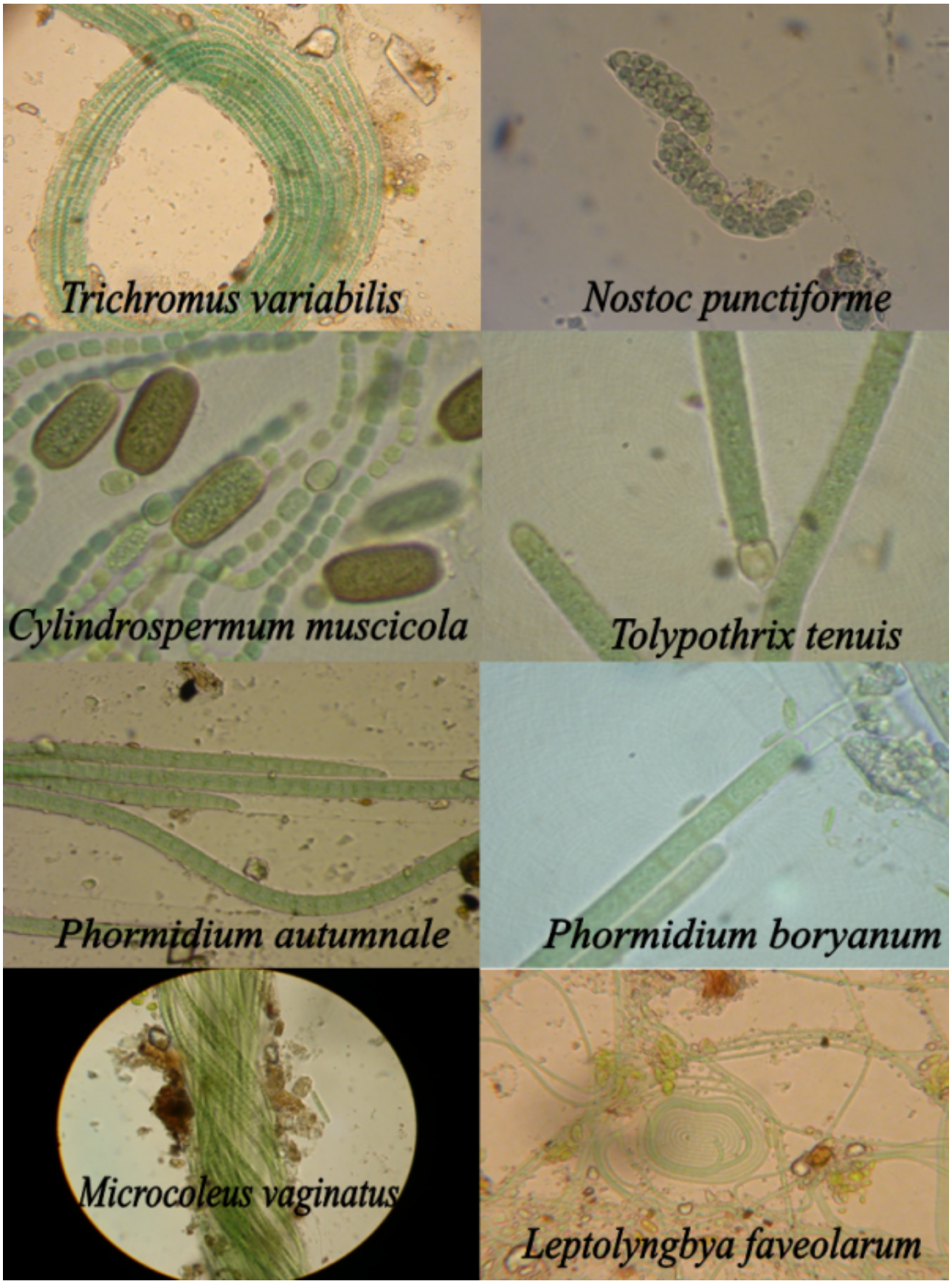

Рис. 2. Доминирующие виды цианобактерий городских почв
Fig. 2. Dominant species of cyanobacteria in urban soils

Специфическим видом парковой зоны является гетероцистная ЦБ *Nodullaria harveyana.* Формула экобиоморф CF_{12} P_8 PF_1 X_1 M_1.

Коэффициент флористической связи Съеренсена – Чекановского указывает на сходство альгофлоры сравниваемых зон (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициент Съеренсена – Чекановского зон г. Кирова

	Промышленная	Транспортная	Селитебная	Рекреационная
Промышленная				
Транспортная	0.52			
Селитебная	0.54	0.60		
Рекреационная	0.63	0.58	0.57	

Таким образом, видовой состав ЦБ г. Кирова достаточно разнообразен и представлен безгетероцистными и гетероцистными видами. Толерантность к антропогенной и техногенной нагрузке проявляют, в первую очередь, *Phormidium autumnale, Ph. boryanum, Microcoleus vaginatus*, *Nostoc punctiforme*, *N. paludosum.*

Внутрипочвенный пул цианобактерий городских почв

Внутрипочвенные группировки фототрофов распределены во всей толще почвы с определенной плотностью и являются стабильной частью почвенной микробиоты. Численность, биомасса, видовой состав этих организмов, их сезонная динамика и продуктивность чрезвычайно подробно изучены в XX веке почвенными альгологами в различных регионах нашей страны, в разных климатических зонах и экосистемах, включая урбанизированные территории. Материалы почвенно-альгологических исследований опубликованы в многочисленных монографиях, начиная с классических работ Э. А. Штина и М. М. Голлербаха (1969; 1975), а также в сборниках и трудах съездов, конференций, симпозиумов.

Изучение зимней вегетации почвенной альгофлоры показало, что доминантами в фототрофных комплексах являются *Anabaena sphaerica*, различные виды рода *Nostoc, Phormidium autumnale и Microcoleus vaginatus*.

При проведении количественного учета водорослей методом прямой микроскопии в зимних почвенных образцах было обнаружено, что их численность ЦБ превышает миллион клеток в 1 г почвы (табл. 5).

Таблица 5. Численность клеток микрофототрофов в городских почвах в зимний период (тыс. клеток/г)

Место отбора проб	Водоросли	Цианобактерии	Всего
Районы промышленных предприятий	200–250	1217–2983	1467–3183
Улицы города	330–400	1180–2117	1580–2417
Парки	320–330	1180–2743	1510–3063

Таблица 6. Соотношение водорослей и цианобактерий в почве в зимний период (%)

Место отбора проб	Водоросли	Цианобактерии
Районы промышленных предприятий	7.8–13.6	86.4–92.2
Улицы города	16.5–20.9	79.1–83.5
Парки	10.8–21.2	78.8– 89.2

Минимальные и максимальные значения численности фототрофов во всех обследованных районах близки. Доминируют в почвах по численности ЦБ (до 92,2 %), в то время как вклад эукариотных водорослей не превышает 22 %. Максимальное представительство ЦБ обнаружено в зоне действия промышленных предприятий (табл. 6). Высокая численность ЦБ в почве явно свидетельствует об их активном размножении зимой в период с аномально теплой погодой, длительным отсутствием снежного покрова и непромерзанием почвы. Вероятно, длительный теплый период после непродолжительного снегопада в начале ноября и таяния выпавшего снега спровоцировал выход водорослей из периода покоя, аналогично тому, как в конце ноября – начале декабря происходило набухание почек на деревьях.

«Цветение» городских почв

Феномен «цветения» характерен как для сельскохозяйственных, целинных, так и для городских почв, в которые от различных источников поступают самые разнообразные вещества: тяжелые металлы, органические отходы, синтетические соединения, соли, пластмассы и т. д. Степень их токсичности варьирует в широком диапазоне в зависимости от их химической природы, количества и качества гумуса, аэрации, кислотного режима, скорости микробного разложения поллютантов и т. д. Вследствие этого жизнь микробиоты в городских почвах постоянно сопровождается высоким шансом перехода в стрессовые ситуации и необычайной пестротой загрязнителей. Вероятно, поэтому провести четкую корреляционную зависимость развития ЦБ от конкретного поллютанта практически невозможно.

Чтобы оценить вклад ЦБ в «цветение» почвы, мы изучали структурные особенности поверхностных альго-цианобактериальных разрастаний в районах города с различной степенью техногенной нагрузки. Помимо численности клеток ЦБ и водорослей, определяли длину грибного мицелия, поскольку именно ЦБ, водоросли и микромицеты составляют основу наземных микробных ценозов и могут рассматриваться как единое целое.

Анализ видового состава показал, что выделяются определенные доминанты сообществ при «цветении» почвы разных зон (табл. 7). Видно, что для всех зон, кроме промышленной, на естественных нарушенных и ненарушенных почвах преобладают безгетероцистные ЦБ. Только на субстратах (опилки с песком – промышленная зона в районе ТЭЦ-5) лидирующие позиции занимают азотфиксирующие гетероцистные ЦБ, видимо, настолько обогащая субстрат связанным минеральным азотом, что это приводит и к массовому развитию зеленых водорослей, которые в других очагах «цветения» обнаруживаются лишь в незначительных количествах (табл. 7, 8).

Таблица 7. Доминанты пленок «цветения»

Зона обследования	Виды-доминанты
Промышленная	*Nostoc muscorum, N. paludosum, Trichromus variabilis*
Селитебная	*Phormidium uncinatum, Ph. aerugeniocoeruleum, Ph. autumnale, Ph. boryanum*
Парковая	*Ph. formosum, Ph. breve, Trichromus variabilis, Leptolyngbya augustissima*
Транспортная	*Schizothrix friesii, Ph. aerugenio-coeruleum, Ph. ambiguum,*

Плотность клеток в цианобактериальных разрастаниях чрезвычайно велика и колеблется в разных зонах города от 18 до 47 млн/см^2 (табл. 8).

Таблица 8. Показатели численности клеток водорослей и ЦБ в пленках «цветения» в различных зонах города (тыс./см^2)

обследования	Зеленые водоросли	Диатомовые водоросли	БГЦ циано-бактерии	ГЦ цианобактерии	Всего
Промышленная	1265 ± 40	515 ± 20	5850 ± 150	18600 ± 1000	26300
Селитебная	446 ± 42	2050 ± 57	17978 ± 781	0	20474
Парковая	0	540 ± 30	10660 ± 500	7070 ± 213	18270
Транспортная	200 ± 10	610 ± 20	43360 ± 900	3500 ± 210	46860

Различные группы фототрофов принимают различное участие в формировании структуры наземных разрастаний (рис. 3). Особенно показателен факт доминирования безгетероцистных ЦБ (от 60 до 100 % в структуре популяций ЦБ) во всех случаях, если имеем дело с почвой, а не с урабаноземом, где явно складываются другие условия развития фототрофов. Кроме того, вероятно, что опилки и песок, которые и составляют субстрат вокруг ТЭЦ, не накапливают того количества поллютантов, как в почвах, которые выбивают азотфиксирующие виды ЦБ из наземных сообществ.

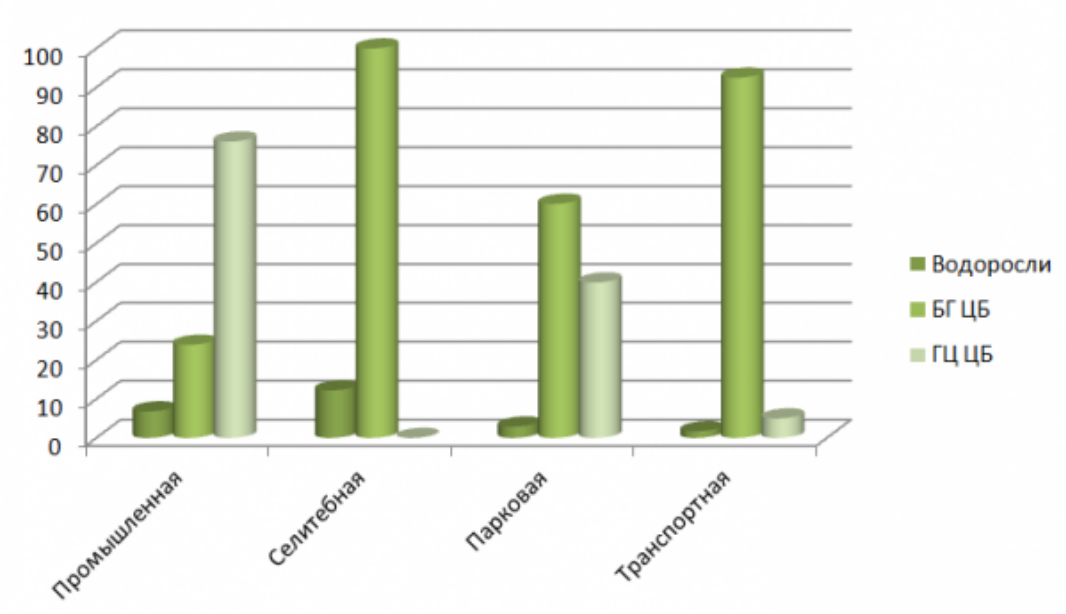

Рис. 3. Структура популяций фототрофов в пленках «цветения» (%) в различных зонах города. Условные обозначения: БГ ЦБ –безгетероцистные цианобактерии, ГЦ ЦБ –гетероцистные цианобактерии

Fig. 3. Phototrophic population structure in ‘blooming’ films (%) in different parts of the city (Industrial zone, Settlement zone, Park zone, Transport zone). Symbols: NH CB – non-heterocystic cyanobacteria, HC CB – heterocystic cyanobacteria

Хотя во всех городских экотопах при «цветении» почвы преобладают не водоросли, а ЦБ (в структуре популяций фототрофов их численность колеблется от 87.8 до 98.3 %), уровень развития самих ЦБ, их безгетероцистных и гетероцистных форм резко различен в разных местообитаниях (табл. 2). Так, в почвах транспортной и селитебной зон наблюдается абсолютное господство безгетероцистных ЦБ (92,5 и 100 % соответственно). В парковой зоне – почти паритетное представительство (60.1 % – безгетероцистные, 39.9 % – гетероцистные ЦБ). Но в промышленной зоне на искусственном субстрате из древесных опилок и песка азотфиксирующие гетероцистные ЦБ в структуре популяций составляют 76.1 %, а безгетероцистные – 23.9 %. Вероятно, длительное воздействие на почву городских поллютантов, которые с воздухом попадают и в парковые, и в селитебные зоны, селектирует популяции ЦБ в сторону преимущественного развития безгетероцистных форм, так как высокая чувствительность фермента нитрогеназа к загрязнителям у азотфиксирующих ЦБ может блокировать их размножение. В то же время безазотистый субстрат, который периодически обновляется у ТЭЦ, не успевает адсорбировать и накапливать поллютанты в количестве, опасном для их развития.

Включение в количественную характеристику наземных разрастаний, помимо биомассы фототрофов, биомассы микромицетов, являющихся составной частью подобных ценозов, показывает, что данная величина колеблется от 2.7 мг/см^2 в парковой зоне до 4.8 мг/см^2 в транспортной (рис. 4). При этом во всех зонах свыше 95 % приходится на долю фототрофного компонента. Суммарная длина нитей ЦБ и грибного мицелия колеблется от 49 до 110 м/см^2, что указывает на их большую роль в скреплении частиц почв и субстрата (рис. 5).

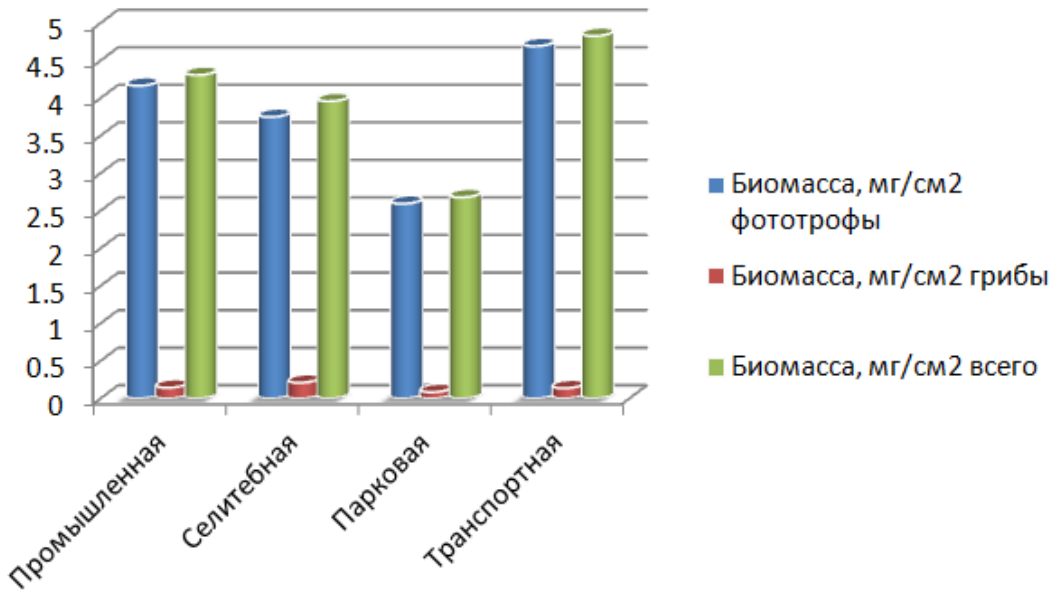

Рис. 4. Биомасса почвенных микроорганизмов при «цветении» почвы в различных зонах города, мг/см^2

Fig. 4. Biomass of soil microorganisms in soil ‘blooming’ in different parts of the city (Industrial zone, Settlement zone, Park zone, Transport zone), mg/cm^2

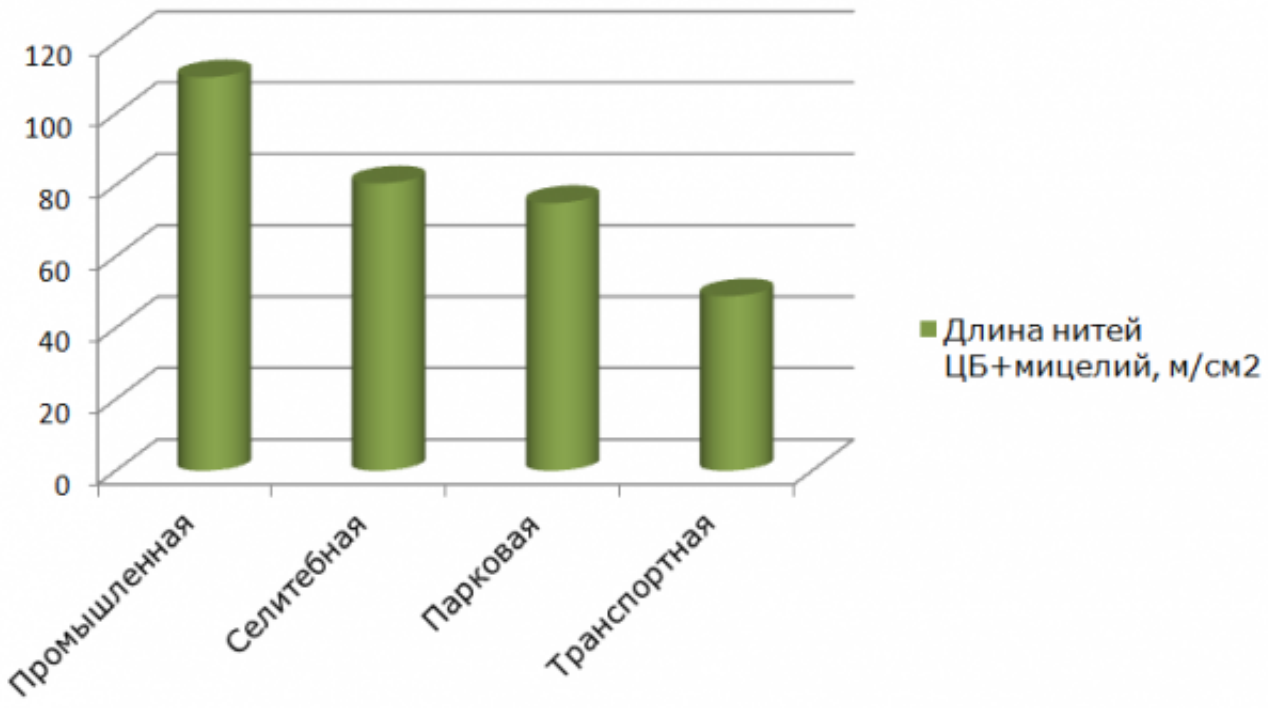

Рис. 5. Длина нитей цианобактерий и мицелия микромицетов в поверхностных разрастаниях в различных зонах города, м/см^2

Fig. 5. The length of cyanobacteria filaments and micromycete mycelium in the surface growth in different zones of the city (Industrial zone, Settlement zone, Park zone, Transport zone), m/cm^2

Исследование «цветения» почвы на городской территории показало, что сроки «цветения», по сравнению с природными экотопами, являются более длительными. Например, отмечен феномен зимнего «цветения» почвы, которое продолжалось почти две недели (с 29 ноября до 10 декабря) на

дворовой территории в условиях устойчивого снежного покрова в местах, где проходит теплоцентраль (табл. 9).

Таблица 9. Особенности зимнего «цветения» почвы

Показатель	Водоросли		Цианобактерии		Всего
	Зеленые	Диатомовые	БГЦ	ГЦ	
Численность клеток, тыс./см^2	1270 ± 200	180 ± 9	3017 ± 130	6020 ± 190	10487 ± 529
Структура популяций фототрофов, %	13.8		86.2		100
Структура популяций ЦБ, %			33.4	66.6	100
Биомасса, мг/см^2	0.115	0.201	0.238	0.975	1.529

Примечание. БГЦ – безгетероцистные цианобактерии; ГЦ – гетероцистные цианобактерии.

В один и тот же период характер «цветения» почвы может резко различаться в промышленных зонах города. Так, был проведен сравнительный анализ пленок «цветения», отобранных в конце октября 2011 г. около биохимзавода (северный район города) и около ТЭЦ-5 (южный район города). Флористический состав комплексов «цветения» представлен в табл. 10.

Таблица 10. Видовой состав фототрофов позднеосеннего «цветения» почвы

Район биохимзавода	Район ТЭЦ-5
1. *Nostoc commune*	1. *Nostoc commune*
2. *Anabaena sp.*	2. *N. muscorum*
3. *Phormidium boryanum*	3. *Phormidium sp.*
4. *Leptolyngbya foveolarum*	4. *Schizothrix sp.*
5. *Nostoc sp.*	5. *Microhaeta tenera*
6. *Phormidium henningsy*	6. *N. punctiforme*
7. *Phormidium ambiguum*	7. *Microcoleus vaginatus*
8. *Hantzschia amphioxys*	8. *Hantzschia amphioxys*

Как видно из табл. 10, в обоих случаях микроценозы сформированы 8 видами фототрофов. При этом наблюдается редкий случай, когда в составе альгоценоза полностью отсутствуют вездесущие зеленые водоросли, а диатомеи представлены только одним видом – *Hantzschia amphioxys*. Фактически в комплексах фототрофов присутствуют только ЦБ.

Количественно-структурные особенности «цветения» почвы в техногенных зонах города отражены в табл. 11.

Общие признаки пленок «цветения» в обоих экотопах следующие:

– необычайно высокая плотность популяций фототрофов (68–93 млн клеток/см^2), которая ранее никогда не фиксировалась нами и другими исследователями в наземных разрастаниях;

– полное отсутствие зеленых и желтозеленых водорослей, которые, как правило, встречаются постоянно;

– абсолютное доминирование ЦБ (97–98 %);

– высокая суммарная длина нитей ЦБ (171–187 м/см^2);

– преобладание в структуре популяций микромицетов с окрашенным (меланизированным) мицелием (60–72 %);

– большой вклад в формирование сетчато-нитчатой структуры разрастаний фототрофов нитей ЦБ и мицелия микрогрибов (187–252 м/см^2).

Таблица 11. Сравнительная характеристика группировок «цветения» почвы в техногенных зонах г. Кирова

Показатель	Район биохимзавода	Район ТЭЦ-5
Численность клеток фототрофов, млн/см^2		
Гетероцистные ЦБ	32.2 ± 6.0	19.7 ± 2.6
Безгетероцистные ЦБ	28.8 ± 0.8	72.2 ± 4.4
Диатомеи	1.8 ± 0.2	1.22 ± 0.027

Всего фототрофов	62.8 ± 7.0	93.12 ± 7.0
Длина нитей ЦБ, м/см^2		
Гетероцистные ЦБ	128.0	78.8
Безгетероцистные ЦБ	43.2	108.3
Суммарная длина	171.2	187.1
Структура популяций ЦБ, %		
Гетероцистные ЦБ	52.79	21.4
Безгетероцистные ЦБ	47.21	78.6
Структура популяций фототрофов, %		
ЦБ	97.13	98.7
Водоросли	2.87	1.3
Длина мицелия микромицетов, м/см^2		
Окрашенный	48.96 ± 9.6	36.8 ± 2.3
Бесцветный	32.0 ± 3.2	14.4 ± 0.6
Всего	80.96 ± 12.8	51.2 ± 2.9
Структура популяций микромицетов, %		
Окрашенный	60.47	71.87
Бесцветный	39.53	28.13
Суммарная длина нитей ЦБ и мицелия микромицетов, м/см^2		
Длина нитей ЦБ + длина мицелия	252.2	187.1

Эти результаты свидетельствуют об оптимальных условиях даже в конце октября для развития ЦБ на поверхности. Сформированные цианобактериальные комплексы совместно с микромицетами создают плотный поверхностный покров, скрепляющий почвенные частицы. Однако преобладание окрашенных популяций микромицетов указывает на повышенный уровень загрязнения почвы. Одновременно выявлены существенные различия в структуре комплексов микроорганизмов «цветения» почвы двух техногенных зон города:

– плотность популяций фототрофов в районе ТЭЦ-5 примерно в полтора раза выше, чем в районе биохимзавода;

– преобладание в структуре популяций ЦБ гетероцистных форм в районе биохимзавода (52.79 %) и явное доминирование (78.6 %) безгетероцистных форм в районе ТЭЦ-5;

– в районе ТЭЦ-5 наблюдается и более высокий процент участия меланизированных форм (почти 72 %) в структуре популяций микромицетов.

Вероятно, в этих техногенных зонах характер развития ЦБ и микромицетов обусловлен разницей в химическом составе попадающих в почву поллютантов.

Сравнительная характеристика структурных особенностей любых наземных разрастаний городских почв приведена в табл. 12.

Таблица 12. Специфика количественных показателей биопленок «цветения» городских почв

Зона обследования	Биомасса, мг/см^2			Структура популяций, %		Длина нитей ЦБ + мицелий, м/см^2
	Фототрофы	Грибы	Всего	Фототрофы	Грибы	
Промышленная	4.165	0.143	4.308	96.7	3.3	110.2
Селитебная	3.749	0.210	3.959	94.7	5.3	80.5
Парковая	2.594	0.085	2.679	96.8	3.2	75.0
Транспортная	4.692	0.136	4.828	97.2	2.8	48.9

Анализ полученных данных показывает, что для данных микробных комплексов, развивающихся в различных зонах города, характерны следующие особенности: преобладание в структуре биомассы фототрофного компонента (до 97.2 %), а не микромицетов, и существенная длина нитей ЦБ и мицелия (до 100 м/см^2), скрепляющих частицы почвы и субстрата.

Обсуждение

Фототрофные микробные комплексы городских почв формируют как эукариотные водоросли, так и ЦБ. Видовое обилие внутрипочвенных группировок представлено 123 видами и разновидностями, преобладают цианобактерии (43,1 %), при этом в число доминантов входят безгетероцистные ЦБ: *Phormidium autumnale, Ph. boryanum, Ph. formosum, Ph. uncinatum, Leptolyngbya foveolarum, Microcoleus vaginatus* и азотфиксаторы: *Nostoc punktiforme, N. paludosum, N. muscorum, Cylindrospermum licheniforme, Trichromus variabilis, Tolypothrix tenuis*.

Явным доказательством развития фототрофных микроорганизмов в городских почвах служит

феномен «цветения» почвы – явление массового размножения этих организмов на поверхности. Возникновение «цветения» связано не только с комплексом благоприятных экологических условий, которые дают сигнал массовому размножению. Существует наличие критической численности клеток (внутрипочвенные сгустки), своеобразные «окна для инвазии», через которые и происходит миграция клеток снизу вверх на поверхность, лишенную высшей растительности (Домрачева, 2005). Места массового размножения фототрофов становятся центрами повышенной биологической активности, так как в виде экзометаболитов в окружающую среду выделяется значительное количество продуктов фотосинтеза. Вследствие этого вокруг клеток и их комплексов создается особая зона повышенной концентрации органических веществ.

Как сами клетки фототрофов, так и их выделения представляют субстрат питания для других организмов и источник биохимического влияния на них. Поэтому возникает сеть трофических и аллелопатических взаимоотношений с сапротрофами и биотрофами. Текстура фототрофных микробных комплексов – величина непостоянная. Характер отношений между разными группами фототрофов меняется в связи с изменением их плотности, возраста, физиологического состояния и экологической обстановки.

Анализ альгологических работ показал, что «цветение» почвы имеет ряд характерных свойств, независимо от места возникновения, сезона, типа почвы, доминирующих группировок: 1. Массовое размножение на поверхности характерно для немногих видов: в описанных наземных сообществах их структуру формируют всего от 5 до 27 популяций фототрофных микроорганизмов. 2. Количество видов, формирующих наземные альгоценозы, намного меньше видового пула в почве. Пресс экологических и антропогенных факторов позволяет вегетировать и размножаться на поверхности от 10 до 50 % видов, выявляемых в глубине. Таким образом, на уровне фототрофных микробных сообществ проявляется общая экологическая закономерность: флористическая емкость экотопов всегда выше флористической емкости фитоценозов, формирующихся в этих экотопах. 3. Роль отдельных видов, формирующих «цветение», различна. Выделяются популяции фототрофов, способные в геометрической прогрессии увеличивать свою численность, что приводит к доминирующей роли данной популяции в сообществе. Среди доминантов наиболее часто встречаются нитчатые формы ЦБ р.р. *Cylindrospermum, Nostoc, Anabaena, Oscillatoria* и др.

Однозначно судить о состоянии городских почв по особенностям развития фототрофов в пленках «цветения», видимо, невозможно. Однако в качестве надежного критерия, указывающего на повышенный уровень загрязнения, выступают популяции микромицетов, а именно преобладание в их структуре меланизированных форм. В то же время анализ «цветения» почв урбанизированных территорий указывает, что наиболее устойчивыми к городским поллютантам являются отдельные виды безгетероцистных цианобактерий, которые в перспективе являются биоагентами-ремедиаторами.

Заключение

Наиболее ярко экологически значимые функции ЦБ и водорослей проявляются при «цветении» почвы. Исследование феномена «цветения» почвы на урбанизированной территории (территория г. Кирова) показало, что для «цветения» городских почв и субстратов характерны следующие особенности.

1. Наиболее интенсивное «цветение», как правило, наблюдается в конце лета и осенью, вплоть до декабря в аномально теплые зимы. Наземные альгоценозы при этом представляют многовидовые сообщества с доминированием различных видов водорослей и цианобактерий.

2. Видовая насыщенность фототрофных наземных сообществ различна в разных районах города. Максимальное видовое обилие фототрофов характерно для промышленной (29 видов) и парковой (20 видов) зон. Минимальная численность видов обнаружена в пленках «цветения» почв транспортной (8 видов) и селитебной (7 видов) зон.

3. Комплексы доминантов на нарушенных и ненарушенных почвах состоят из безгетероцистных цианобактерий родов *Phormidium* и *Leptolyngbya.* На урбаноземах в промышленной зоне (районы ТЭЦ) лидирующие позиции занимают гетероцистные азотфиксирующие ЦБ *Nostoc muscorum, N. paludosum, Trichromus variabilis*, настолько обогащая субстрат связанным минеральным азотом, что это приводит к массовому развитию зеленых водорослей (8 видов), которые в других пленках «цветения» обнаруживаются единично.

4. Плотность фототрофных популяций в пленках «цветения» колеблется в разных зонах города от 18 до 47 млн клеток/см^2 (в отдельных случаях – свыше 90 млн клеток/см^2).

5. Различные группы фототрофов принимают различное участие в формировании наземных

разрастаний. Доля эукариотных водорослей сравнительно невелика и составляет от 2 до 12 %. При абсолютном доминировании цианобактерий в поверхностных альго-цианобактериальных комплексах различается степень участия в сложении сообщества их безгетероцистных и гетероцистных форм. Безгетероцистные ЦБ доминируют во всех зонах города, кроме промышленной, со степенью участия от 60 до 100 % в структуре популяций цианобактерий. В то же время в промышленной зоне на урбаноземе доминирование азотфиксирующих цианобактерий в биопленках достигает 76 %.

6. Кроме фототрофов, постоянным значимым компонентом в биопленках являются микромицеты, имеющие формы с бесцветным и окрашенным мицелием. Длина мицелия грибов в пленках «цветения» колеблется от 14 до 35 м/см^2. Преобладание меланизированных форм в структуре популяций микромицетов (68,3 % в промышленной зоне и 76,4 % – в транспортной) указывает на напряженную экологическую обстановку в данных районах города.

В целом «цветение» почвы или субстратов на урбанизированных территориях можно рассматривать как положительное явление, так как наземное массовое размножение фототрофов приводит к быстрому обогащению урбаноземов мобильным, доступным для сапротрофов, органическим веществом; присутствие в альго-цианобактериальных ценозах нитчатых цианобактерий и мицелия грибов способствует укреплению субстрата, выполняя противоэрозионные функции.

Библиография

Аксёнова Н. П. Материалы к флоре эдафофильных водорослей и цианопрокариот кладбищ г. Ижевска (Удмуртская Республика) // Водоросли и цианобактерии в природных и сельскохозяйственных экосистемах: Материалы Междунар. научно-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. Э. А. Штиной. Киров: Вятская ГСХА, 2010. С. 18–21.

Антипина Г. С., Комулайнен С. Ф. Структура и сравнение альгофлористических комплексов урбанизированных экосистем (на примере города Петрозаводска) // Водоросли и цианобактерии в природных и сельскохозяйственных экосистемах: Материалы Междунар. научно-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. Э. А. Штиной. Киров: Вятская ГСХА, 2010. С. 25–30.

Артамонова В. С. Влияние урбанизации на микробное население почв // Водоросли и цианобактерии в природных и сельскохозяйственных экосистемах: Материалы Междунар. научно-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. Э. А. Штиной. Киров: Вятская ГСХА, 2010. С. 30–35.

Ашихмина Т. Я. Экологические проблемы и особенности урбоэкосистем (на примере г. Кирова) // Особенности урбоэкосистем подзоны южной тайги Европейского Северо-Востока. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2012. С. 6–24.

Голлербах М. М., Штина Э. А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.

Домрачева Л. И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар, 2005. 336 с.

Дубовик И. Е., Климина И. П. Эпифитные водоросли древесных растений в городах Предуралья // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 10. С. 1527–1534.

Кабиров Р. Р., Суханова Н. В. Почвенные водоросли городских газонов (Уфа, Башкортостан) // Ботанический журнал. 1997. Т. 82. № 3. С. 46–57.

Климина И. П. Эпифитные сообщества цианопрокариот, водорослей и микроскопических грибов древесных растений г. Уфы и возможность их использования в биоиндикации: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Уфа, 2011. 18 с.

Кондакова Л. В. Альго-цианобактериальная флора и особенности ее развития в антропогенно нарушенных почвах (на примере почв подзоны южной тайги Европейской части России): Автореф. дис. … д-ра биол. наук. Сыктывкар, 2012. 34 с.

Смирнова Н. Г. Особенности развития почвенных и эпифитных водорослевых ценозов в сообществах широколиственных лесов: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Уфа, 2013. 19 с.

Сугачкова Е. В. Альгогруппировки рекреационных экосистем // Проблемы ботаники на рубеже 20–21 вв. 1998. С. 116–117.

Суханова Н. В., Фазлутдинова А. И., Хайбуллина Л. С. Диатомовые водоросли почв городских парков // Почвоведение. 2000. № 7. С. 840–846.

Трухницкая С. М., Чижевская М. В. Альгофлора рекреационных территорий Красноярской урбоэкосистемы. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2008. 135 с.

Хайбуллина Л. С. Почвенные водоросли в городских сообществах рудеральных растений // Проблемы ботаники на рубеже 20–21 вв. 1998. С. 120.

Штина Э. А., Голлербах М. М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.

CYANOBACTERIA OF URBAN SOILS

DOMRACHEVA Lyudmila — *Vyatka state agricultural Academy, dli-alga@mail.ru*

KONDAKOVA Lyubov — *Vyatka state University of Humanities, kaf_eco@vshu.kirov.ru*

ZYKOVA Julia — *Vyatka state agricultural Academy, orewek7@rambler.ru*

EFREMOVA Vitalina — *Vyatka state University of Humanities, kaf_eco@vshu.kirov.ru*

Keywords:
Soil cyanobacteria
species composition
urban soils
soil grouping of phototrophs
soil "blooming"
cyanophytisation of algocenoses.

Summary:
Cyanobacteria constantly exist in the soil and ground complexes of phototrophic microorganisms in urban soils. In soil "blooming" , including the phenomenon of the winter "blooming", it is this group of organisms that dominates in terrestrial growth in different areas of the city (industrial, transport, residential, park areas), leaving the representatives of eukaryotic algae in the minor position. Cyanobacteria are characterized by rather wide species diversity, with the predominance of non-heterocystic forms as well as high-density of populations (up to tens of million cells per 1 cm2). Cyanophytization of phototrophic microbial complexes is a characteristic feature of urban soils.