

Специфика почвенной альгоцианофлоры в условиях антропогенного воздействия

© 2025. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,

Н. В. Сырчина², к. х. н., с. н. с.,

И. А. Кондакова², к. фил. н., доцент,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

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

²Вятский государственный университет,

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

e-mail: ecolab2@gmail.com

Альгоцианофлора является важнейшим компонентом населяющей почву микробиты. Интенсивное антропогенное воздействие приводит к значительной трансформации естественных микробиологических сообществ, что вызывает ряд негативных последствий. Сравнительное изучение видового состава микрофототрофов, населяющих почвы с разным характером антропогенного воздействия (1 – почвы заповедника; 2 – почвы техногенной территории; 3 – почвы сельскохозяйственных предприятий), показало, что наиболее богатым видовым составом микрофототрофов отличались почвы заповедной территории. Обработка почвы и внесение в избыточных количествах свиных навозных стоков привело к снижению биоразнообразия микрофототрофов на 30%. В условиях техногенной нагрузки биоразнообразие снизилось почти на 50%. Наиболее высокую толерантность к антропогенной нагрузке проявили: *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta). Наименее устойчивыми к антропогенному давлению оказались охрофитовые микроводоросли, наиболее устойчивыми – зелёные. На сообщества почвенных микрофототрофов существенное влияние оказал техногенный фактор. На участке, испытывающем техногенную нагрузку, видовое разнообразие микрофототрофов по сравнению с контролем меньше почти в два раза. В относительно богатых элементами питания растений агроэкоценозах биоразнообразие микрофототрофов незначительно уступало заповедной территории (35 и 49 видов). Альгоиндикация по сообществам водорослей и цианобактерий выступает в качестве информативного и чувствительного экспресс-метода оценки состояния почв. Реакцией на изменение условий среды является изменение видового состава и численности микрофототрофов.

Ключевые слова: почвы, альгоцианофлора, микрофототрофы, антропогенная деятельность, цианобактерии, микроводоросли.

Soil algocyanoflora specificity under anthropogenic pressure

© 2025. L. V. Kondakova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-2190-686X¹,

N. V. Syrchina², ORCID: 0000-0001-8049-6760²,

I. A. Kondakova², ORCID: 0000-0001-9336-8709²

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: ecolab2@gmail.com

Algocyanoflora is an important component of soil microbiota. Anthropogenic pressure causes considerable transformation of natural microbiological communities. Thus there are certain negative consequences. We compare the microphototroph species content in soils differ in the character of the anthropogenic pressure: site 1 – nature reserve soils; site 2 – technogenic soils; site 3 – soils used in agricultural holdings, farms. As a result the richest microphototrophic species composition was in nature reserve soils. Soil management and heavy fertilizing with swine manure slurry decreased microphototrophic biodiversity by 30%. Technogenic pressure decreased biodiversity almost by 50%. *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*,

Chlorella vulgaris, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), and *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta) are the most tolerant to anthropogenic pressure. Ochrophyte microalgae species are the least tolerant to anthropogenic pressure, while green algae are most tolerant ones. Technogenic factor greatly affects the soil microphototrophic communities. At the technogenically stressed site microphototroph species diversity is almost two times lower compared to the control site (nature reserve). The microphototroph biodiversity in nutrient-rich agrozems is just a bit less than in nature reserve (35 and 49 species, respectively). Algorindication according to algae and cyanobacteria communities is an informative and sensitive quick-test in assessing the soil status. Changes in the species composition and abundance of microphototrophs are a response to changes in environmental conditions.

Keywords: soils, algocyanoflora, microphototrophs, anthropogenic activity, cyanobacteria, microalgae.

Почвенная альгоцианофлора представляет собой весьма разнообразную группу микроорганизмов (МО), включающую автотрофные прокариоты (цианобактерии) и эукариотические микроводоросли. Фототрофные МО играют исключительно важную роль в почвообразовательных процессах: связывании атмосферного азота, круговороте веществ и биогенных элементов, создании благоприятных условий для жизнедеятельности растений и почвенных животных. Согласно имеющимся оценкам, эффективность фиксации CO₂ микроводорослями примерно в 10–50 раз выше, чем высшими растениями [1, 2], благодаря чему они вносят значительный вклад в поддержание баланса CO₂ в атмосфере [3, 4]. Обитающие в почве цианобактерии (ЦБ) способны устанавливать симбиотические ассоциации с растениями, грибами, бактериями, оказывать стимулирующее влияние на рост высших растений, метаболизировать широкий спектр загрязняющих веществ, включая пестициды и антибиотики [5–7]. Вместе с тем, многие представители ЦБ (токсигенные ЦБ) входят в число самых опасных организмов нашей планеты, поскольку синтезируют и выделяют в окружающую среду токсичные соединения – фикотоксины. Нарушение естественных механизмов сдерживания размножения ЦБ и водорослей вызывает негативные экологические последствия, например, «цветение» водоёмов. Фикотоксины могут накапливаться растениями и переноситься по пищевым цепям на другие трофические уровни, что представляет угрозу для человека и животных. В последние годы токсигенные ЦБ привлекают большое внимание исследователей в качестве биотехнологического инструмента получения натуральных биоцидов для защиты культурных растений, а также фармацевтических препаратов с выраженным противоопухолевым, антибактериальным, противовирусным, противогельминтным действием [8].

Снижение видового разнообразия почвенных микрофототрофов отражается на сло-

жившихся между разными группами МО консортивных связях, что приводит к трансформации естественных биогеохимических циклов, уменьшению запасов органического вещества, изменению баланса питательных элементов, накоплению экотоксичных соединений, утрате супрессивности [9].

Несмотря на высокий адаптационный потенциал и способность выживать в условиях экологического и эволюционного давления, микрофототрофы проявляют значительную чувствительность к наличию в почве питательных и загрязняющих веществ, при этом воздействие низких и высоких доз поллютантов на соответствующие МО может варьировать от стимуляции до полного ингибирования [10]. Выявленная реакция микрофототрофных сообществ на те или иные виды воздействий представляет определённый интерес для разработки методов биоиндикации экологического состояния территорий и объектов окружающей среды [11, 12]. В этом отношении особую научную и практическую значимость приобретают исследования, направленные на выявление связей и отношений между условиями обитания и спецификой формирующихся в соответствующих условиях сообществ водорослей и ЦБ, а также прогнозирование рисков негативной трансформации соответствующих сообществ в сторону сокращения полезных и глобального распространения вредных микрофототрофных организмов [13, 14].

Цель работы – изучить видовое разнообразие альго-цианобактериальных сообществ, сформированных на почвах с разным характером антропогенного воздействия.

Объекты и методы исследования

Для оценки различных видов антропогенного воздействия на состав почвенной альгоцианофлоры были выбраны три вида участков на территории Кировской области. Первый участок находится на территории разнотравно-злакового луга в заповеднике

«Нургуш» (участок 1). Второй участок расположен в зоне воздействия крупного промышленного предприятия области – в районе хвостохранилища мела завода по производству минеральных удобрений (участок 2), третий – в окрестностях свинокомплекса на пахотном поле, удобряемом навозными стоками (участок 3). Для обозначения почвы участка 1 в контексте настоящей работы используется термин «почва заповедника», участка 2 – «техногенная почва», участка 3 – «агрогенная почва».

Отбор проб для анализа проводился в соответствии с требованиями микробиологии. Видовой состав микрофототрофов определяли методом постановки водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [15]. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности. Названия идентифицированных видов в настоящей статье приведены в соответствии с международной номенклатурой (www.algaebase.org).

Результаты и обсуждение

В результате выполненных исследований в почвах различных участков было выявлено 69 видов водорослей и ЦБ, в том числе: *Cyanobacteria* – 21; *Chlorophyta* – 29; *Ochrophyta* – 12; *Bacillariophyta* – 7. Наибольшее видовое разнообразие было представлено зелёными водорослями и ЦБ. Данные о видовом составе сообществ микрофототрофов, сформировавшихся на изученных территориях, приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведён таксономический состав альгоцианофлоры почвы разных участков.

Полученные данные показали, что наиболее богатым видовым составом альгоцианофлоры отличались почвы заповедной территории. Интенсивное агрогенное воздействие (обработка почвы, внесение в избыточных количествах свиных навозных стоков) привело к снижению биоразнообразия водорослей и ЦБ на участке 3 (агрогенная почва) на 30% относительно почвы заповедной территории. В условиях техногенного воздействия (техногенная почва) биоразнообразие микрофототрофов снизилось почти на 50%.

К видам, выявленным только в почве заповедника, следует отнести *Cylindrospermum muscicola*, *Tolypothrix tenuis* (*Cyanobacteria*), *Borodinella polytetras*, *Chlamydomonas conversa*, *Cylindrocystis crassa*, *C. brebissonii*, *Gongrosira debaryana*, *Protoderma viride*, *Penium*

borgeanum (*Chlorophyta*), *Characiopsis minutissima*, *Ch. saccata*, *Ellipsoidion oocystoides*, *Pleurochloris commutate*, *P. anomala*, *Vischeria helvetica*, *V. aculeate* (*Ochrophyta*).

Наименее устойчивыми к антропогенному давлению оказались охрофитовые водоросли. Для представителей этого отдела, например, *Characiopsis*, *Vischeria*, характерно образование симбиотических связей с ксилотрофными грибами, широко представленными в почвах естественных биотопов (лесных, луговых) [16]. Очевидно, бедные растительными остатками техногенные почвы являются неблагоприятной средой для существования ксилотрофных грибов и связанных с ними *Ochrophyta*. Для обнаруженного в агрогенной почве вида *Xanthonema exile* характерна способность образовывать толстостенные гипнобласты, что способствует выживанию в неблагоприятных климатических условиях [17]. В техногенно нарушенных почвах данный вид не был выявлен. Возможно, это обусловлено высокой чувствительностью *Xanthonema exile* к загрязнению среды тяжёлыми металлами [18], что характерно для промышленных зон.

Более высокое видовое разнообразие диатомовых водорослей наблюдали в удобряемых навозными стоками почвах (агрогенная почва). Сообщества *Bacillariophyta* положительно реагируют на наличие в почве органического вещества, а также неорганических и органических соединений фосфора [19]. Фосфор является критически важным элементом для роста диатомовых водорослей. Благоприятное для диатомовых водорослей содержание биодоступного фосфора и органики обеспечено за счёт внесения в почву участка 3 высоких доз свиных навозных стоков. Использование в качестве удобрений навозных стоков также способствует повышению влажности почвы, что очень важно для чувствительных к этому фактору диатомей. Виды *Luticola mutica* и *Hantzschia amphioxys* менее чувствительны к наличию влаги и могут выдерживать длительные периоды высыхания [20]. Присутствующая на всех изученных территориях *Hantzschia amphioxys* проявляет высокую устойчивость к токсичным соединениям, включая гербициды [21], что обуславливает её конкурентные преимущества в окружающей среде. Результаты исследований дают основание предположить, что внесение в почву навозных стоков обеспечивает благоприятную экологическую нишу для активного развития *Bacillariophyta*. Считается, что эти МО являются хорошими продуцентами ор-

Таблица 1 / Table 1

Состав сообществ микрофототрофов в почвах различных участков
Species composition of microphototrophic communities in soils of different ecotopes

Таксоны, виды / Taxons, species		Участки / Sites		
		1	2	3
Cyanobacteria				
1	<i>Cylindrospermum muscicola</i> Kütz.	+	-	-
2	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> (Bory) Kütz.	+	-	+
3	<i>Cylindrospermum michailovskoënsë</i> Elenk.	-	-	+
4	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+
5	<i>Leptolyngbya boryana</i> (Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	+
6	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	+
7	<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	-
8	<i>Nostoc linckia</i> (Roth) Born. et Flah. f. <i>muscorum</i> (Ag.) Elenk.	+	-	+
9	<i>Nostoc paludosum</i> Kütz.	+	-	+
10	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kütz.) Elenk.	+	+	+
11	<i>Phormidium aerugineo-caeruleum</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	+
12	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	-	+
13	<i>Phormidium breve</i> (Kütz. ex Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	-
14	<i>Phormidium boryanum</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+
15	<i>Phormidium henningsii</i> Lemm.	+	+	-
16	<i>Phormidium formosum</i> (Bory ex Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	-
17	<i>Phormidium jadinianum</i> Gom.	+	+	-
18	<i>Phormidium molle</i> (Kütz.) Gom.	+	+	-
19	<i>Phormidium uncinatum</i> (Ag.) Gom.	+	-	+
20	<i>Pseudanabaena catenata</i> Laut.	-	-	+
21	<i>Tolypothrix tenuis</i> Kütz. ex Born. et Flah.	+	-	-
Всего Cyanobacteria / The total of Cyanobacteria		15	9	13
Chlorophyta				
1	<i>Actinochloris sphaerica</i> Korsch.	+	-	+
2	<i>Borodinella polytetras</i> Mill.	+	-	-
3	<i>Bracteacoccus minor</i> (Chodat) Petrova	+	-	+
4	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch. var. <i>gloeogama</i>	+	+	+
5	<i>Chlamydomonas gelaninosa</i> Korsch. in Pascher	+	+	-
6	<i>Chlamydomonas minutissima</i> Korsch. in Pascher	+	+	+
7	<i>Chlamydomonas oblongella</i> Lund	+	+	-
8	<i>Chlamydomonas conversa</i> Korsch.	+	-	-
9	<i>Chlorococcum dissectum</i> Korsch.	-	-	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+
11	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. var. <i>vulgaris</i>	+	+	+
12	<i>Chloroplana terricola</i> Hollerb.	+	+	+
13	<i>Chlorosarcinopsis minor</i> (Gerneck) Herndon	-	+	-
14	<i>Cylindrocystis crassa</i> De Bary	+	-	-
15	<i>Cylindrocystis brebissonii</i> Menegh. var. <i>brebissonii</i>	+	-	-
16	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.	+	-	-
17	<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+	+
18	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lokh.	+	+	+
19	<i>Klebsormidium dissectum</i> (F.Gay) H.Ettl et G.Gärtner	-	+	-
20	<i>Klebsormidium rivulare</i> (Kütz.) M.O.Morison et Sheath	-	+	-
21	<i>Palmella miniata</i> Leibl	-	-	+
22	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	+	-
23	<i>Protoderma viride</i> Kütz.	+	-	-
24	<i>Follicularia paradoxalis</i> Mill.	-	-	+

Таксоны, виды / Taxons, species		Участки / Sites		
		1	2	3
25	<i>Penium borgeanum</i> Skuja	+	–	–
26	<i>Scotiellopsis levicostata</i> (Hollerb.) Puncocharova et Kalina	+	+	–
27	<i>Stichococcus bacillaris</i> Näg.	–	+	–
28	<i>Stichococcus minor</i> Näg.	–	+	–
29	<i>Tetracystis aggregata</i> R.M. Brown et H.C. Bold	–	+	+
Всего Chlorophyta / The total of Chlorophyta		20	17	13
Ochrophyta				
1	<i>Characiopsis minutissima</i> Pasch.	+	–	–
2	<i>Characiopsis saccata</i> Carter	+	–	–
3	<i>Ellipsoidion oocystoides</i> Pasch.	+	–	–
4	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	+	–	+
5	<i>Pleurochloris commutata</i> Pasch.	+	–	–
6	<i>Pleurochloris anomala</i> James	+	–	–
7	<i>Bumilleria klebsiana</i> Pasch.	–	+	+
8	<i>Vischeria magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	+	–	+
9	<i>Vischeria helvetica</i> (Visch. et Pasch.) Hibberd	+	–	–
10	<i>Vischeria irregularis</i> Pasch.	+	–	–
11	<i>Vischeria aculeata</i> Pasch.	+	–	–
12	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs.) Silva	–	–	+
Всего Ochrophyta / The total of Ochrophyta		10	1	4
Bacillariophyta				
1	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+
2	<i>Luticola cohnii</i> (Hilse) Mann in Round et al.	–	–	+
3	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	–
4	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	–	+
5	<i>Nitzschia palea</i> (Kütz.) W. Smith	–	–	+
6	<i>Pinnularia borealis</i> Ehr.	+	–	+
7	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	–	–	+
Всего Bacillariophyta / The total of Bacillariophyta		4	2	6
Итого / Total		49	26	35

Примечание: «+» означает, что вид обнаружен, «–» – вид не обнаружен. Здесь и в таблицах 2, 3: участок 1 – почвы заповедника, участок 2 – почвы техногенной территории, участок 3 – почвы сельскохозяйственных предприятий.

Note: “+” – the species is detected, “–” – the species is not detected. Here and in Table 2, 3: site 1 – nature reserve soils, site 2 – technogenic soils, site 3 – soils used in agricultural holdings, farms.

Таблица 2 / Table 2

Таксономическая структура альгоцианофлоры почв различных участков
Taxonomic composition of soil algocyanoflora in different sites

Отдел / Division	Таксономический состав альгоцианофлоры / Taxonomic composition of algocyanoflora						Всего видов Total number of species
	Участок 1 Site 1		Участок 2 Site 2		Участок 3 Site 3		
	A	B	A	B	A	B	
Цианобактерия	15	30,6	6	23,1	13	37,2	21
Chlorophyta	20	40,8	17	65,4	12	34,3	29
Ochrophyta	10	20,4	1	3,8	4	11,4	12
Bacillariophyta	4	8,2	2	7,7	6	17,1	7
Всего по участкам Total for sites	49	100	26	100	35	100	–

Примечание: A – число видов; B – доля от общего числа видов соответствующего таксона, %; «–» – нет данных.
Note: A – number of species; B – proportion of the total number of species of the corresponding taxon, %; “–” – no data.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты Жаккара флористического сходства сравниваемых участков
Jaccard Similarity Coefficient of the compared sites flora

Участок / Site	1	2	3
1		31,6	33,3
2			29,8
3			

ганического вещества и играют важную роль в формировании и стабилизации почвенных агрегатов [22].

На сообщества почвенных ЦБ наиболее существенное влияние оказал техногенный фактор. В техногенно нарушенных почвах (участок 2) разнообразие ЦБ существенно уменьшилось (на 60% относительно почв заповедника). Данный факт свидетельствует о развитии глубоких деградиционных процессов. В относительно богатых питательными веществами агрозёмах биоразнообразие ЦБ лишь незначительно уступало разнообразию ЦБ в почвах заповедника.

Цианобактерии *Leptolyngbya boryana* и *Phormidium boryanum* были выявлены только в антропогенно нарушенных почвах. Нитчатая ЦБ *Leptolyngbya boryana* широко распространена в водных и наземных экосистемах разных экотопов. Замечательной особенностью данного МО является повышенная устойчивость к воздействию соединений мышьяка (As). Возможно, данная особенность обеспечивает конкурентные преимущества *L. boryana* в техногенных почвах [23]. *Phormidium boryanum* хорошо приспособлена к существованию в загрязнённых средах и средах с повышенным содержанием солей, что также повышает её устойчивость в условиях антропогенной нагрузки [24, 25].

Сообщества Chlorophyta отличались относительно высоким разнообразием на всех изученных территориях, однако на агрогенной почве видовое разнообразие соответствующих МО было на 35% ниже, чем в почве заповедника, что крайне нежелательно для поддержания плодородия и супрессивности агрозёмов. Известно, что Chlorophyta играют важную роль в борьбе с деградацией нарушенных земель. Обеспечение условий для поддержания их численности, разнообразия и баланса с другими МО в почвах имеет большое природоохранное значение. В настоящее время проводится значительное количество исследований, посвящённых использованию некоторых видов Chlorophyta в качестве зелёных удобрений [26, 27].

Определённый интерес представляет изменение соотношения Chlorophyta и

Суанобактерия в техногенной и агрогенной почвах. В техногенной почве наблюдается значительное снижение количества видов ЦБ, в агрогенной – зелёных водорослей (относительно почвы заповедника). Вероятной причиной соответствующего явления может выступать баланс биодоступного фосфора и связанного азота [28]. Для удобряемых навозными стоками почв (агрогенная почва) характерно очень высокое содержание подвижного фосфора (700 и более мг/кг) на фоне относительно низкого содержания азота [29, 30]. Соответствующие условия значительно повышают конкурентные преимущества азотфиксирующих ЦБ. В условиях техногенного давления в бедных биодоступными фосфатами почвах (участок 2) ЦБ утрачивают соответствующие преимущества и их видовое разнообразие сокращается.

Как в техногенно, так и в агрогенно нарушенных почвах были обнаружены виды, не отмеченные в почве заповедника. Так, на участке 2 выявлены: *Leptolyngbya fragilis*, *Phormidium formosum* (Cyanobacteria), *Chlorosarcinopsis minor*, *Klebsormidium dissectum*, *Klebsormidium rivulare* (Chlorophyta); на участке 3 – *Cylindrospermum michailovskoense*, *Pseudanabaena catenata* (Cyanobacteria), *Palmella miniata*, *Follicularia paradoxalis* (Chlorophyta), *Xanthonema txile* (Ochrophyta), *Luticola cohnii*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia intermedia* (Bacillariophyta). Опубликовано очень мало работ, посвящённых особенностям метаболизма и экологической роли соответствующих МО. Однако, в ряде исследований отмечается, что *Phormidium formosum* относится к продуцентам фикотоксина [31], *Leptolyngbya fragilis* способна метаболизировать нефтяные углеводороды и может быть использована в качестве идеального кандидата для биоремедиации загрязнённых углеводородами участков [32], *Pseudanabaena catenata* была идентифицирована как доминирующий фотосинтетический организм во время «цветения» в радиоактивном пруду с отработанным ядерным топливом [33].

В таблице 3 приведены коэффициенты флористического сходства сравниваемых участков почв.

Коэффициенты Жаккара указывают на слабое флористическое сходство сравниваемых участков. Антропогенная нагрузка приводит к уменьшению общего видового разнообразия микрофототрофов. Слабое сходство альгоцианофлоры обеспечивают толерантные виды, выявленные на всех участках: *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (ЦБ), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta).

Заключение

Интенсивная хозяйственная деятельность оказывает существенное влияние на видовой состав почвенной альгоцианофлоры. В антропогенно нарушенных почвах наблюдается снижение видового разнообразия как ЦБ, так и водорослей относительно участка на территории заповедника. Снижение биоразнообразия микрофототрофов в агрогенных и техногенных почвах свидетельствует о развитии деградиционных процессов. Особую опасность представляет дегградация земель сельскохозяйственного назначения, поскольку нарушенные почвы утрачивают супрессивность, способность к самоочищению, нормальному протеканию геохимических процессов и поддержанию баланса питательных элементов.

Наиболее толерантными к антропогенной нагрузке оказались такие виды микрофототрофов как *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta).

Альгоиндикация почв по сообществам водорослей и цианобактерий выступает в качестве информативного и чувствительного экспресс-метода оценки экологического состояния почв. Реакцией на изменение условий среды является изменение видового состава альгоцианофлоры.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Subashchandrabose S.R., Ramakrishnan B., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Mixotrophic cyanobacteria and microalgae as distinctive biological agents for organic pollutant degradation // Environ. Int. 2013. V. 51. P. 59–72. doi: 10.1016/j.envint.2012.10.007
2. Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. CO₂ bio-mitigation using microalgae // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2008. V. 79. P. 707–718. doi: 10.1007/s00253-008-1518-y
3. Prasad R., Gupta S.K., Shabnam N., Oliveira C.Y.B., Nema A.K., Ansari F.A., Bux F. Role of microalgae in global CO₂ sequestration: Physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective // Sustainability. 2021. V. 13. No. 23. Article No. 13061. doi: 10.3390/su132313061
4. Singh U.B., Ahluwalia A.S. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration // Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. 2013. V. 18. No. 1. P. 73–95. doi: 10.1007/s11027-012-9393-3
5. Hooda S., Malik G., Saini P., Grewal A., Pandey V.C. Cyanobacteria as a potential bioasset for restoring degraded land // Land Degrad. Dev. 2023. V. 34. No. 12. P. 3435–3450. doi: 10.1002/ldr.4711
6. Yeheyo H.A., Ealias A.M., George G., Jagannathan U. Bioremediation potential of microalgae for sustainable soil treatment in India: A comprehensive review on heavy metal and pesticide contaminant removal // J. Environ. Manage. 2024. V. 363. Article No. 121409. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121409
7. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Kondakova I.A. The ground sulphur effect on algocyanoflora of alkaline soil // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 1. P. 131–140 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-131-140
8. Gärtner G., Stoyneva-Gärtner M., Uzunov B. Algal toxic compounds and their aeroterrestrial, airborne and other extremophilic producers with attention to soil and plant contamination: A review // Toxins. 2021. V. 13. No. 5. Article No. 322. doi: 10.3390/toxins13050322
9. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, north-eastern China // Sci. Rep. 2024. V. 14. No. 1. Article No. 15629. doi: 10.1038/s41598-024-65646-5
10. Ramakrishnan B., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R., Sethunathan N. The impacts of environmental pollutants on microalgae and cyanobacteria // Crit. Rev. Env. Sci. Technol. 2010. V. 40. No. 8. P. 699–821. doi: 10.1080/10643380.802471068
11. Carvalhido V., Bessa da Silva M.B., Santos M., Tamagnini P., Melo P., Pereira R. Development of an ecotoxicological test procedure for soil microalgae // Sci. Total Environ. 2021. V. 783. Article No. 147006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147006
12. Chung M.K., Hu R., Wong M.H., Cheung K.C. Comparative toxicity of hydrophobic contaminants to

- microalgae and higher plants // *Ecotoxicology*. 2007. V. 16. No. 5. P. 393–402. doi: 10.1007/s10646-007-0134-4
13. Hu W., Su S., Mohamed H.F., Xiao J., Kang J., Krock B., Xie B., Luo Z., Chen B. Assessing the global distribution and risk of harmful microalgae: A focus on three toxic *Alexandrium* dinoflagellates // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 948. Article No. 174767. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174767
14. Spatharis S., Dolapsakis N.P., Economou-Amilli A., Tsirtsis G., Danielidis D.B. Dynamics of potentially harmful microalgae in a confined Mediterranean Gulf-Assessing the risk of bloom formation // *Harmful algae*. 2009. V. 8. No. 5. P. 736–743. doi: 10.1016/j.hal.2009.03.002
15. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. M.: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).
16. Mukhin V.A., Patova E.N., Sivkov M.D., Novakovskaya I.V., Neustroeva N.V. Diversity and nitrogen-fixing activity of phototrophic mycetobionts of xylotrophic fungi // *Russ. J. Ecol.* 2018. V. 49. No. 5. P. 406–412. doi: 10.1134/S1067413618050090
17. Gaisina L.A. Effects of extreme temperatures on *Xanthonema exile* (Klebs) Silva (Xanthophyta) // *Russ. J. Ecol.* 2006. V. 37. No. 3. P. 213–216. doi: 10.1134/S106741360603012X
18. Gaisina L.A., Khaibullina L.S. Influence of heavy metals on the morphology of the soil algae *Xanthonema exile* (Klebs) Silva // *Eurasian Soil Science*. 2007. V. 40. P. 313–317. doi: 10.1134/S1064229307030106
19. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kondakova I.A. Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 184–190 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-184-190
20. Zhang Y., Ouyang S., Nie L., Chen X. Soil diatom communities and their relation to environmental factors in three types of soil from four cities in central-west China // *Eur. J. Soil Biol.* 2020. V. 98. Article No. 103175. doi: 10.1016/j.ejsobi.2020.103175
21. Cassol A.P.V., Zanella R., Torgan L.C. Soil diatoms in rice fields: comparison between organic and conventional systems and alterations after herbicide application // *Acta Botanica Brasiliica*. 2024. V. 38. Article No. e20230145. doi: 10.1590/1677-941X-ABB-2023-0145
22. Heger T.J., Straub F., Mitchell E.A.D. Impact of farming practices on soil diatoms and testate amoebae: A pilot study in the DOK-trial at Therwil, Switzerland // *Eur. J. Soil Biol.* 2012. V. 49. P. 31–36. doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.08.007
23. Zhu F., Yang M., Luo Z.X., Yu R.L., Hu G.R., Yan Y. Bioaccumulation and biotransformation of arsenic in *Leptolyngbya boryana* // *Environ. Sci. Pollut.* 2020. V. 27. P. 29993–30000. doi: 10.1007/s11356-020-09294-y
24. Klemenčič A.K., Balabanič D. Fitobentos in kako-vost vode v mrtvicah reke Mure // *Natura Sloveniae*. 2010. V. 12. No. 2. P. 5–22. doi: 10.14720/ns.12.2.5-22
25. Kurt O., Ulcay S., Taşkın E., Öztürk M. Taxonomy and description of the three marine cyanophycean algae from the Mediterranean Sea // *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.* 2010. V. 10. No. 1. P. 33–37. doi: 10.4194/trjfas.2010.0105
26. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // *Biotechnol. Adv.* 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.00
27. Gonzalez-Gonzalez L.M., de-Bashan L.E. The potential of microalgae–bacteria consortia to restore degraded soils // *Biology*. 2023. V. 12. No. 5. Article No. 693. doi: 10.3390/biology12050693
28. Kim H.S., Hwang S.J., Shin J.K., An K.G., Yoon C.G. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir // *Hydrobiologia*. 2007. V. 581. No. 1. P. 255–267. doi: 10.1007/s10750-006-0501-9
29. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Pilip L.V., Kondakova I.A. Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 190–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197
30. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. The effect of enrichment tailings of phosphorites as fertilizers on soil algocyanobacterial communities // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 174–180 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-174-180
31. Baker P.D., Steffensen D.A., Humpage A.R., Nicholson B.C., Falconer I.R., Lanthois B., Fergusson K.M., Saint C.P. Preliminary evidence of toxicity associated with the benthic cyanobacterium *Phormidium* in South Australia // *Environ. Toxicol.* 2001. V. 16. No. 6. P. 506–511. doi: 10.1002/tox.10009
32. Ghanbarzadeh M., Niknam V., Soltani N., Ebrahimzadeh H. *Leptolyngbya fragilis* ISC 108 is the most effective strain for dodecane biodegradation in contaminated soils // *Int. J. Phytoremediation*. 2019. V. 21. No. 9. P. 908–920. doi: 10.1080/15226514.2019.1583635
33. Foster L., Muhamadali H., Boothman C., Siee D., Pittman J.K., Goodacre R., Morris K., Lloyd J.R. Radiation tolerance of *Pseudanabaena catenata*, a cyanobacterium relevant to the first generation magnox storage pond // *Front. Microbiol.* 2020. V. 11. Article No. 515. doi: 10.3389/fmicb.2020.00515