

Специфика фототрофных наземных микробных комплексов в посевах пшеницы

© 2024. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор,
П. А. Стариков³, аспирант,

Л. И. Домрачева^{1,3}, д. б. н., профессор,

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,

³Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133

email: dli-alga@mail.ru

В статье представлены результаты определения видового и количественного состава водорослей и цианобактерий в наземных разрастаниях в посевах пшеницы, семена которой перед посевом были инокулированы различными микроорганизмами в монокультурах, бинарных и тройных сочетаниях. Видовой состав альгоцианофлоры «цветущей» почвы был представлен 24 видами, в том числе: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5. Инокулянтами были представители прокариотных и эукариотных микроорганизмов – антагонисты *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp. и фитопатоген *Fusarium culmorum*. В одном из вариантов опыта использовали предпосевную обработку фунгицидом «Максим»®. Показано, что при формировании «цветения» почвы доминантами микробиома являются зелёные водоросли (*Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*) и цианобактерии (виды родов *Leptolyngbya*, *Phormidium*). При определении численности фототрофных популяций установлено, что их плотность колеблется от 1,8 до 8,1 млн кл./см². При этом максимум развития фототрофов обнаружен в контрольном варианте, а минимальная численность – в варианте с химическим протравителем. В вариантах с микробной инокуляцией пик развития микрофототрофов характерен для случаев с обработкой тройной смесью и бинарной смесью *Fischerella* + *Trichoderma*. Определение структуры микробных популяций показало, что на искусственном инфекционном фоне выявлено сильнейшее доминирование цианобактерий (80,2%), обусловленное предпосевной инокуляцией семян пшеницы фитопатогеном *F. culmorum*. Относительно высокое содержание цианобактерий (до 60%) наблюдается в 4-х вариантах эксперимента (*Fischerella*, *Fischerella* + *Trichoderma*, *Trichoderma* + *Fusarium*, *Fischerella* + *Fusarium*) и в оставшихся 4-х вариантах отмечается некоторое доминирование микроскопических водорослей в пределах от 52 до 58%. Следовательно, по результатам исследований, в отличие от химического фунгицида, существенно подавляющего развитие водорослей и цианобактерий, микробная инокуляция не приводит к радикальным сдвигам в состоянии наземных фототрофных микробных сообществ.

Ключевые слова: «цветение» почвы, биопрепараты, цианобактерии, водоросли, видовой состав, численность микрофототрофов.

Specificity of phototrophic terrestrial microbial complexes under wheat crops

© 2024. L. V. Kondakova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-2190-686X³

P. A. Starikov³, ORCID: 0000-0002-3205-6696³

L. I. Domracheva^{1,3}, ORCID: 0000-0002-7104-3337³

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,

³Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: dli-alga@mail.ru

The article presents the results of determining the species and quantitative composition of algae and cyanobacteria in terrestrial growths under wheat crops. The wheat seeds were inoculated with various microorganisms in mono-, binary and triple combinations before sowing. Algocyanoflora of the “blooming” soil was represented by 24 species: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5. The inoculants were representatives of prokaryotic and eukaryotic microorganisms – antagonists of *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp. and the phytopathogen *Fusarium culmorum*. In one of the experimental variants, pre-sowing treatment with the fungicide “Maksim”® was used. It has been shown that during the formation of soil “blooming” the dominant microbiomes are green algae (*Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*) and cyanobacteria (species of the genera *Leptolyngbya*, *Phormidium*). When determining the number of phototrophic populations, it was found that their density ranges from 1.8 to 8.1 million cells/cm². At the same time, the maximum development of phototrophs was found in the control variant, and the minimum number was found in the variant with a chemical disinfectant. In variants with microbial inoculation, the peak development of microphototrophs is typical for treatment with a triple mixture and a binary mixture of *Fischerella* + *Trichoderma*. Determination of the structure of microbial populations showed that the strongest dominance of cyanobacteria (80,2%) was detected on an artificial infectious background caused by pre-sowing inoculation of wheat seeds with the phytopathogen *F. culmorum*. A relatively high content of cyanobacteria (up to 60%) is observed in 4 experimental variants (*Fischerella*, *Fischerella* + *Trichoderma*, *Trichoderma* + *Fusarium*, *Fischerella* + *Fusarium*) and in the remaining 4 variants there is some dominance of microscopic algae ranging from 52 to 58%. Therefore, according to the results obtained, microbial inoculation does not lead to radical changes in the state of terrestrial phototrophic microbial communities, while chemical fungicide significantly suppresses the development of algae and cyanobacteria.

Keywords: soil “blooming”, biological products, cyanobacteria, algae, species composition, number of microphototrophs.

Массовое развитие водорослей и цианобактерий на поверхности изнутрипочвенного пула фототрофов получило название «цветение» почвы. Этот феномен характерен для пахотных, целинных и городских почв. Как правило, в норме для «цветения» характерны сезонная динамика, смена доминантов, существенные колебания численности и биомассы, изменение структуры, приводящие в конечном итоге к созданию своеобразной псевдоткани.

Впервые описание «цветения» пахотных почв было проведено в Англии в 1927 г. [1]. Отмечалось, что после продолжительных сильных дождей поверхность всего пшеничного поля была покрыта зеленовато-чёрным студенистым слоем толщиной около 1 мм, состоящим из водорослей. На необработанном участке водоросли образовывали более тонкий светло-зелёный слой, едва заметный невооружённым глазом. Между этими крайностями были все переходы на других участках, причём на тех, где было наибольшее количество азота, наблюдался максимальный рост водорослей.

Впоследствии наиболее детальные описания «цветения» пахотных почв с определением видового состава и численности водорослей и цианобактерий были проведены в Кировской области [2–4].

В настоящее время «цветение» почвы часто используют как диагностический признак при оценке её состояния [5], влияния на микробиоту не только абиотических факторов, но и различных агрохимикатов, поллютантов, высших растений [6, 7].

Одним из проявления «цветения» почвы служит образование биологических почвенных корок, которые являются неотъемлемой частью экосистем засушливых земель и часто включа-

ются в долгосрочные программы экологического мониторинга [8]. Среди доминирующих групп организмов, формирующих биологические почвенные корки, выделяются водоросли и цианобактерии, способные выступать в качестве «первопроходцев» в колонизации территорий, лишённых почвенного покрова [9].

Образование почвенно-водорослевых корок создаёт хорошие условия для дальнейшего развития почвы, поскольку способствует образованию органического вещества, ассоциации грибов с другими микроорганизмами. В регионах, подверженных техногенному загрязнению, водорослевые корки улавливают загрязняющие вещества из атмосферных выбросов. За счёт водорослевых корок в почве накапливаются минеральные агрегаты различного химического состава в сопровождении биотических конгломератов, спор и пыльцы, микроорганизмов, частиц целлюлозы и лигнина. Такой структурно и химически изменчивый субстрат обеспечивает лучшие условия для удержания воды и последующего развития органического компонента почвы [10]. Отмечается важная роль цианобактериальных корок в стабилизации ландшафта, а именно в защите почв от брызговой эрозии [11]. Также показано, что инокуляция цианобактериями потенциально может использоваться в качестве способа восстановления почв на засушливых территориях. При этом формирование почвенной биоплёнки улучшается в случае наличия растительного покрова, защищающего цианобактерии на поверхности от абиотических стрессов и процессов эрозии [12].

Однако исследований о влиянии на процессы «цветения» внесённых в почву гетеро-

трофных микробных культур (биопрепаратов различного назначения или провокационного заражения растений фитопатогенами), практически не встречается. Безусловно, интродукция любых микроорганизмов в почву, происходящая при предпосевной инокуляции семян, в первую очередь, влияет на ризосферную микробиоту. Но не исключена вероятность и того, что при развитии поверхностных разрастаний из внутрипочвенного пула водорослей и цианобактерий возможны определённые изменения, обусловленные прямым или косвенным влиянием интродуцентов.

Цель работы – сравнение видового состава и количественных параметров альгоцианобактериальных комплексов поверхностных разрастаний в посевах яровой пшеницы в вариантах с предпосевной инокуляцией семян различными микробными культурами.

Объект и методы исследований

Микроделяночный опыт с яровой пшеницей (*Triticum aestivum* L.) был заложен в 2023 г. на полях Федерального аграрного научного центра им. Н.В. Рудницкого совместно с сотрудниками лаборатории иммунитета и защиты растений Т.К. Шешеговой и Л.М. Щеклеиной.

В качестве предшественника выступал чистый пар. Почва опытных участков дерново-подзолистая, среднесуглинистая, сформированная на мергелизованных пермских глинах, слабосмытая высококультуренная (средний индекс окультуренности 0,83). Агрохимическая характеристика почвы: содержание гумуса – 3,56%; содержание подвижного фосфора – 334–349 мг/кг; обменного калия – 232–304 мг/кг почвы; рН солевой вытяжки – 5,0–5,4.

Для инокуляции семян использовали 3 штамма микроорганизмов как в монокультурах, так и в виде сочетаний. Изолят гриба К-01П, выделенный из почвы на берегу р. Мостовица в микрорайоне «Чистые пруды» г. Киров, по совокупности культуральных и морфологических признаков идентифицирован как представитель рода *Trichoderma* [13]. Вторым объектом была цианобактерия *Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. штамм 300, изолированная из дерново-подзолистой почвы в Кировской области. Оба штамма поддерживаются в коллекции микроорганизмов кафедры биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии Вятского государственного агротехнологического университета

на соответствующих питательных средах. В качестве фитопатогена использовали *Fusarium culmorum* Р-з/16, выделенный из зерна озимой ржи и хранящийся в коллекции лаборатории иммунитета и защиты растений ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого».

Повторность четырёхкратная, площадь делянок – 1 м². Посев проводили вручную 18 апреля 2023 г. в соответствии со схемой опыта: 1 – контроль (без обработки семян), 2 – *Trichoderma* spp., 3 – *F. muscicola*, 4 – *F. culmorum*, 5 – *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola*, 6 – *Trichoderma* spp.+ *F. culmorum*, 7 – *F. muscicola* + *F. culmorum*, 8 – *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola* + *F. culmorum*, 9 – эталон (обработка семян химическим фунгицидом «Максим», концентрат суспензии, действующее вещество – флудиоксонил). Инокуляция семян перед посевом заключалась в 30-минутном инкубировании семян в микробных суспензиях: *Trichoderma* spp., титр (7,15±0,96)·10⁷ кон./мл; *F. muscicola*, титр (1,15±0,18)·10⁷ кон./мл; *F. culmorum*, титр (8,90±0,34)·10⁵ кон./мл [14, 15]. Титры суспензий определяли путём подсчёта в камере Горяева в 4-х повторностях. Культуры *Trichoderma* spp. и *F. culmorum* выращивали на картофельно-глюкозном агаре, *F. muscicola* – на жидкой среде Громова № 6 без азота. В варианте № 5 семена выдерживали в смеси *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola* в соотношении 1:1; в вариантах № 6, 7, 8 – замачивали в суспензиях антагонистов, затем подсушивали, после чего помещали в суспензию *F. culmorum*, имитируя заражение инфекцией. Инокулюм *Trichoderma* spp. и *F. culmorum* готовили путём смыва конидий стерильной водой с поверхности колоний на агаризованной среде. Перед замачиванием семян культуру *F. muscicola* гомогенизировали на малом гомогенизаторе MPW-302 (Польша). Время гомогенизации 3 минуты, режим скорости – 9000 об./мин. [16].

Отбор образцов «цветущей» почвы толщиной 5 мм проводили в день уборки урожая 9 августа 2023 г. Почву подсушивали при комнатной температуре до полного высыхания и оставляли на хранение в бумажных пакетах до начала проведения альгоцианобактериального анализа, который начали весной 2024 г. в период максимально интенсивной вегетации фототрофов.

Видовой состав водорослей и цианобактерий – достаточно постоянный признак для характеристики фитоценоза [3]. Изучение видового состава альгоцианофлоры проводили методами чашечных и водных культур.

Образцы «цветущей» почвы, по возможности в ненарушенном состоянии, одинаковой массы во всех вариантах (60 г), помещали в стерильные чашки Петри, увлажняли до 60% от полной влагоёмкости и на поверхность биоплёнки раскладывали покровные стёкла в количестве 4-х на чашку. Для приготовления водных культур использовали питательную среду Тамия. Чашки и колбы с культурами инкубировали при искусственном освещении люминесцентными лампами и естественном освещении. Культуры просматривали многократно за период их развития, начиная с 1–2 недель культивирования до 4-месячного возраста. Идентификация видов проводилась с использованием отечественных и зарубежных определителей. Количественный учёт водорослей и цианобактерий проводили после последней серии определения видового состава методом прямого счёта на мазках под микроскопом [4].

Результаты и обсуждение

Видовой состав альгоцианофлоры «цветущей» почвы был представлен 24 видами, в том числе: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5 (табл. 1). По видовому разнообразию преобладали зелёные водоросли, что характерно для пахотных дерново-подзолистых почв региона. Цианобактерии представлены безгетероцистными формами (видами рода *Leptolyngbya* и *Phormidium*). Из диатомовых водорослей обнаружены *Hantzschia amphioxys* и *Luticola mutica*.

Во всех вариантах опыта были отмечены виды: *Leptolyngbya foveolarum*, *Leptolyngbya boryana*, *Klebsormidium flaccidum*, *Chlorococcum infusionum*, *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica*.

Доминирующими видами практически во всех вариантах являлись зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *Chlorococcum infusionum* и цианобактерии: *Leptolyngbya foveolarum*, *Leptolyngbya boryana*, *Phormidium autumnale*.

Высокое сходство с контрольным вариантом имеют варианты: *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp., фунгицид. Умеренное сходство с контролем в вариантах: *Fusarium culmorum*, *Trichoderma* sp., *Trichoderma + Fusarium culmorum* и *Trichoderma + Fusarium culmorum*, фунгицид. Сравнение вариантов между собой показало умеренное сходство, за исключением вариантов: *Fischerella muscicola* и *Fusarium culmorum + Fischerella muscicola*; *Trichoderma* sp. и *Fischerella muscicola*. Стопроцентное сходство альгоцианофлоры отмечено в вариан-

тах *Fischerella muscicola* и фунгицид; *Fusarium culmorum + Trichoderma + Fischerella muscicola* и фунгицид (табл. 2).

Определение численности водорослей и цианобактерий показало, что во всех вариантах плотность фототрофных популяций достигает нескольких миллионов клеток на 1 см² (табл. 3). Максимальные результаты зарегистрированы в контроле (свыше 8 млн кл./см²) и в варианте с тройной интродукционной смесью, включающей 2-х антагонистов (фишереллу и триходерму) и фитопатоген *F. culmorum* (свыше 5 млн кл./см²). Минимальная общая численность микрофитов характерна для варианта с обработкой посевов пшеницы фунгицидом, где определяемые показатели в 4 раза ниже контрольных.

Если сравнивать показатели численности по отдельным группам фототрофов, то, в первую очередь, следует отметить очень сильное угнетающее действие на зелёные нитчатые водоросли следующих групп интродуцированных микробов: *F. culmorum* и совместного применения фузариума с триходермой, а также фунгицида.

Диатомеи, как и одноклеточные зелёные водоросли, оказались сравнительно нейтральной группой, с небольшими колебаниями численности популяций в разных вариантах.

Группа цианобактерий оказалась чрезвычайно чувствительной к действию химического препарата. Примечательно также, что внесение в почву вместе с семенами чистой культуры цианобактерии в монокультуре, бинарной и тройной смеси к активации размножения цианобактерий в почве ни в одном варианте, по сравнению с контролем, не привело.

Изучение структуры поверхностных разрастаний показало, что только в одном варианте с монокультурой фузариума произошёл очень сильный сдвиг доминирования в сторону цианобактерий (с минимальной долей эукариотных водорослей). Не столь существенное, но всё-таки определённое преобладание цианобактерий по сравнению с контролем существует в вариантах с внесением в почву фишереллы как в монокультуре, так и в бинарной смеси с триходермой (табл. 4).

Таким образом, определение численности и структуры фототрофных микробных популяций показало, что интродуцированные микроорганизмы по-разному воздействуют на группы аборигенных почвенных фототрофов, что проявляется при их поверхностной вегетации. В первую очередь, это сказывается в некотором тормозящем эффекте по сравнению с контролем, причиной которого могут быть опреде-

Таблица 1 / Table 1
 Видовой состав альгоцианофлоры в контроле и вариантах опыта
 Species composition of algyocyanoflora in the control and experimental variants

№	Название видов Species name	Варианты / Variants								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cyanobacteria										
1	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W.et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+	-	+	+	+	-	-
2	<i>Leptolyngbya henningsii</i> Lem.	+	-	+	+	-	+	+	+	+
3	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenhorst ex Gom.) Anagn. et Kom.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>Leptolyngbya hollerbachiana</i> (Elenk.) Anagn. et Kom.	+	-	-	-	-	-	-	-	-
5	<i>Leptolyngbya boryana</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+	-	+	+	+	+	+
6	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	-	+	+	+	+	+	-	+	+
7	<i>Phormidium jadinianum</i> Gom.	-	-	-	-	+	-	+	-	-
Всего Cyanobacteria / Total Cyanobacteria		4	4	5	3	5	5	5	4	3
Chlorophyta + Streptophyta										
8	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	+	-	-	-	-	+	-	+	-
9	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. var. <i>vulgaris</i>	+	-	+	+	-	-	+	-	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	<i>Cosmarium anceps</i> Lund	+	-	-	-	-	-	-	-	-
12	<i>Cosmarium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	-
13	<i>Chlorophyta</i> sp.	-	-	+	+	+	+	+	+	+
14	<i>Follicularia paradoxalis</i> Miller	+	+	+	-	+	-	+	+	+
15	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.	-	-	-	+	+	-	-	-	-
16	<i>Protosiphon</i> sp.	-	+	+	-	-	+	-	-	-
17	<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18	<i>Klebsormidium nitens</i> (Meneg. in Kütz.) Lokhorst	+	+	+	+	-	-	-	+	+
19	<i>Klebsormidium rivulare</i> (Kütz.) comb. nova	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Всего Chlorophyta + Streptophyta		8	5	7	7	5	5	6	7	6
Bacillariophyta										
20	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
21	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
22	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	-	+	-	-	+	-	-	-	-
23	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+	-	-	-	-	-	-	-
24	<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg	+	+	+	-	+	-	+	-	-
Всего Bacillariophyta / Total Bacillariophyta		4	5	3	2	4	2	3	2	2
Всего / Total		16	14	15	12	14	12	14	13	11

Примечание: 1 – контроль; 2 – *Trichoderma*; 3 – *Ficherella muscicola*; 4 – *Fusarium culmorum*; 5 – *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 6 – *Trichoderma* + *Fusarium culmorum*; 7 – *Fusarium culmorum* + *Ficherella muscicola*; 8 – *Fusarium culmorum* + *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 9 – *fungicide*. Знак «+» означает, что вид обнаружен, знак «-» – вид не обнаружен.

Note: 1 – control; 2 – *Trichoderma*; 3 – *Ficherella muscicola*; 4 – *Fusarium culmorum*; 5 – *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 6 – *Trichoderma* + *Fusarium culmorum*; 7 – *Fusarium culmorum* + *Ficherella muscicola*; 8 – *Fusarium culmorum* + *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 9 – *fungicide*. “+” – the species is detected, “-” – the species is not detected.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты Жаккара альго-цианобактериальных комплексов «цветения» почвы
Jaccard indexes of algal-cyanobacterial complexes of the soil "blooming"

Вариант Variant	Контроль Control	<i>Tricho- derma</i> sp.	<i>Fische- rella</i> <i>musci- cola</i>	<i>Fusa- rium</i> <i>culmo- rum</i>	<i>Tricho- derma</i> + <i>Fi- scherella</i> <i>muscicola</i>	<i>Tricho- derma</i> + <i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>	<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>	<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>	Фунги- цид Fungi- cide
Контроль Control		85,7	92,8	60,0	52,9	60,0	85,7	78,6	91,7
<i>Tricho- derma</i> sp.			81,3	36,8	64,7	52,9	55,5	58,8	66,7
<i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>				58,8	45,0	68,7	70,6	75,0	100
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>					44,4	50,0	44,4	56,3	76,9
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>						52,9	64,7	50,0	56,3
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>							52,9	66,7	64,3
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>								50,0	78,6
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>									100
Фунгицид Fungicide									

Таблица 3 / Table 3

Влияние интродуцированных в почву микроорганизмов на численность водорослей
и цианобактерий в поверхностных разрастаниях (кл./см²·10³) / The effect of introduced into soil
microorganisms on algae and cyanobacteria abundance in surface growths (cells/cm²·10³)

Вариант Variant	Водоросли / Algae			Цианобактерии Cyanobacteria	Всего Total
	зелёные одноклеточные green unicellular	зелёные нитчатые green filamentous	диатомовые diatom		
Контроль / Control	930±200	3000±300	300±15	3870±150	8100±665
<i>Trichoderma</i> sp.	1100±100	1230±30	270±50	2370±230	4970±660
<i>Fischerella muscicola</i>	830±25	1270±200	267±5	2730±500	5097±730
<i>Fusarium culmorum</i>	760±150	170±10	100±0	4170±160	5200±320
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	700±120	1230±150	230±50	3000±140	5160±460
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium culmorum</i>	630±100	1230±13	230±15	2730±250	4420±495
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	930±150	760±16	130±15	1931±200	3751±525
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	640±50	2800±400	100±0	2530±250	6070±700
Фунгицид / Fungicide	470±100	470±40	1000±0	770±150	1810±350

Таблица 4 / Table 4

Влияние интродуцированных в почву микроорганизмов на структуру фототрофных микробиомов поверхностных разрастаний (%) / The effect of microorganisms introduced into the soil on the structure of phototrophic microbiomes in surface growths (%)

Вариант / Variant	Водоросли / Algae	Цианобактерии / Cyanobacteria
Контроль / Control	52,2	47,8
<i>Trichoderma</i> sp.	53,7	46,7
<i>Fischerella muscicola</i>	40,1	59,9
<i>Fusarium culmorum</i>	19,8	80,2
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	41,9	58,1
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium culmorum</i>	45,0	55,0
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	48,5	51,5
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	58,3	41,7
Фунгицид / Fungicide	57,5	42,5

лённые типы отношений между аборигенной и интродуцированной микробиотой. Однако того репрессивного эффекта, который оказывает химический фунгицид, не наблюдается.

Выводы

Видовой состав почвенных микрофототрофов во всех вариантах опыта сохраняет достаточно высокое сходство с контролем, что указывает на постоянство сложившегося в пахотной почве микробиома.

Определение численности и структуры фототрофных микробных популяций показало, что интродуцированные микроорганизмы по-разному воздействуют на группы аборигенных почвенных фототрофов, что проявляется при их поверхностной вегетации.

В ходе исследования при постановке модельного опыта в оптимальных условиях влажности и освещения был выявлен потенциал возможной видовой реализации водорослей и цианобактерий и плотности популяции при формировании «цветения» почвы.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что, в отличие от применения химического пестицида для протравливания пшеницы, микробная инокуляция не приводит к катастрофическим изменениям как видового обилия, так и численности аборигенных водорослей и цианобактерий. При этом в различных вариантах имеются определённые флуктуационные колебания исследуемых параметров.

Наиболее сильное воздействие на структурные показатели альго-цианобактериальных комплексов имеет интродукция в почву фитопатогена *F. culmorum*, которая приводит к явному доминированию цианобактерий на фоне существенного снижения доли водорослей

в структуре микробных комплексов. Вероятная причина связана с давно установленной антагонистической активностью данного фитопатогенного гриба.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

Литература

1. Bristol Roach B.M. On the algae some normal English soils // J. Agric. Sci. 1927. V. 17. No. 4. P. 563–588. doi: 10.1017/S0021859600018839
2. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
3. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.
4. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. 336 с.
5. Штина Э.А. Почвенные водоросли как экологические индикаторы // Ботанический журнал. 1990. Т. 75. № 4. С. 441–453.
6. Безденежных К.А., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Ашихмина Т.Я. Альгологический мониторинг почв в районе объекта «Марадьковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 81–88. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088
7. Кондакова Л.В., Дабах Е.В. Мониторинг альго-цианобактериальных сообществ на техногенной территории // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 84–90. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-084-090
8. Belnap J., Phillips S.L., Witwicki D.L., Miller M.E. Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated bio-

logical soil crusts // *J. Arid Environ.* 2008. V. 72. No. 7. P. 1257–1264. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.019

9. Büdel B., Dulić T., Darienko T., Rybalka N., Friedl T. Cyanobacteria and algae of biological soil crusts // *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands* / Eds. B. Weber, B. Büdel, L.J. Belnap. Springer, Cham, 2016. P. 55–80. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0_4

10. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2015. V. 22. No. 4. P. 675–690. doi: 10.1515/eces-2015-0041

11. Bullard J.E., Ockelford A., Strong C., Aubault H. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2018. V. 123. No. 12. P. 3697–3712. doi: 10.1029/2018JG004726

12. Román J.R., Chamizo S., Roncero Ramos B., Adessi A., De Philippis R., Cantón Y. Overcoming field barriers to restore dryland soils by cyanobacteria inoculation // *Soil Tillage Res.* 2021. V. 207. Article No. 104799. doi: 10.1016/j.still.2020.104799

13. Саттон Д., Фотергилл А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно патогенных грибов / Под ред. И.Р. Дорожковой. М.: Мир, 2001. 468 с.

14. Стариков П.А., Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Домрачева Л.И., Трефилова Л.В. Влияние микробной инокуляции семян на развитие грибных болезней яровой пшеницы // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием.* Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 189–194.

15. Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Стариков П.А. Влияние микробной инокуляции семян на биоконтроль корневых гнилей, биометрию растений и урожайность яровой пшеницы // *Таврический вестник аграрной науки.* 2024. № 1 (37). С. 187–197. doi: 10.5281/zenodo.10930956

16. Фокина А.И., Домрачева Л.И., Зыкова Ю.Н., Скугорева С.Г., Лялина Е.И., Трефилова Л.В. Совершенствование тетразолюно-топографического метода биотестирования с использованием цианобактерий // *Теоретическая и прикладная экология.* 2017. № 1. С. 31–41. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

5. Shtina E.A. Soil algae as environmental indicators // *Botanicheskyy Zhurnal.* 1990. V. 75. No. 4. P. 441–453 (in Russian).

6. Bezdenezhnykh K.A., Kondakova L.V., Dabakh E.V., Ashikhmina T.Ya. Algological monitoring of soils in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 2. P. 81–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088

7. Kondakova L.V., Dabakh E.V. Monitoring of algacyanobacterial communities on the technogenic territory // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 1. P. 84–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-084-090

8. Belnap J., Phillips S.L., Witwicki D.L., Miller M.E. Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated biological soil crusts // *J. Arid Environ.* 2008. V. 72. No. 7. P. 1257–1264. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.019

9. Büdel B., Dulić T., Darienko T., Rybalka N., Friedl T. Cyanobacteria and algae of biological soil crusts // *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands* / Eds. B. Weber, B. Büdel, L.J. Belnap. Springer, Cham, 2016. P. 55–80. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0_4

10. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2015. V. 22. No. 4. P. 675–690. doi: 10.1515/eces-2015-0041

11. Bullard J.E., Ockelford A., Strong C., Aubault H. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2018. V. 123. No. 12. P. 3697–3712. doi: 10.1029/2018JG004726

12. Román J.R., Chamizo S., Roncero Ramos B., Adessi A., De Philippis R., Cantón Y. Overcoming field barriers to restore dryland soils by cyanobacteria inoculation // *Soil Tillage Res.* 2021. V. 207. Article No. 104799. doi: 10.1016/j.still.2020.104799

13. Sutton D., Fothergill A., Rinaldi M. The determinant of pathogenic and conditionally pathogenic fungi / Ed. I.R. Dorozhkova. Moskva: Mir, 2001. 468 p. (in Russian).

14. Starikov P.A., Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Domracheva L.I., Trefilova L.V. The influence of microbial inoculation of seeds on the development of fungal diseases of spring wheat // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 189–194 (in Russian).

15. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Starikov P.A. Effect of microbial inoculation of seeds on root rot biocontrol, biometrical parameters and yield of spring wheat // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences.* 2024. No. 1 (37). P. 187–197 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.10930956

16. Fokina A.I., Domracheva L.I., Zykova Yu.N., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Trefilova L.V. Improving tetrazol-topographic method of biotesting using cyanobacteria // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 1. P. 31–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

References

1. Bristol Roach B.M. On the algae some normal English soils // *J. Agric. Sci.* 1927. V. 17. No. 4. P. 563–588. doi: 10.1017/S0021859600018839

2. Gollerbach M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).

3. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).

4. Domracheva L.I. “Blooming” of the soil and patterns of its development. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural RAS Department, 2005. 336 p. (in Russian).