

Н.Ф. Гибадуллин, А.С. Дурова, Е.И. Семенова, И.И. Гайфуллин

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ,
ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАРАСТАНИЯ
ЛЕСОМ БЫВШИХ ПАХОТНЫХ ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Введение. По данным государственного реестра на 1 января 2023 г. земельный фонд Республики Татарстан в административных границах составляет 6 783,7 тысячи гектаров [Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011]. На земли лесного фонда приходится 1 219,1 тыс. га, или 18% от общей площади республики, на земли сельскохозяйственного назначения – 4 618,2 тыс. га, или 68% от общей площади республики. В составе земель сельскохозяйственного назначения сельскохозяйственные угодья составляют 98,08% (4529,6 тыс. га), из них пашня – 75,2% (3406,8 тыс. га), многолетние насаждения – 1,01% (46,2 тыс. га), сенокосы – 2,9% (143,2 тыс. га), пастбища и залежи – 20,6% (933,4 тыс. га).

Сельскохозяйственная освоенность территории республики составляет 68,1%, облесенность – 18%, распаханность сельскохозяйственных угодий – 76%. Облесенность пашни в регионе составляет 3,4% при необходимом минимальном значении 4,7% [Мохамед, 1988; Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011]. Высокая степень распаханности территории при низкой облесенности пашни, до 3,7% (при оптимуме 5-7%), и низком показателе лесистости региона служит предпосылкой развития активных процессов водно-ветровой эрозии [Звягинцев и др., 2005].

Опыт зарубежных и отечественных исследователей показывает, что устойчивый агроландшафт может быть сформирован в том случае, если 75% в нем занимают пашни, леса и луга в равных долях (на каждый из этих компонентов приходится по 25%) [Звягинцев и др., 2005; Toledo et al., 2025]. Потенциал республики для повышения лесистости региона по оценке природоохранных общественных организаций составляют участки сельскохозяйственных земель, заросшие древесно-кустарниковой растительностью возрастом свыше 20 лет (342 тыс. га) и возрастом свыше 3 лет (1818 тыс. га), итого 2160 тыс. га, или 32% от общей площади региона [Гримберг, 2015].

Чтобы понять, как меняется состояние почв при произрастании на бывших пахотных почвах культур сосны, на территории Республики Та-

тарстан (в местах распространения различных типов почв) были заложены почвенные разрезы. В ходе исследования были отобраны образцы почв для дальнейшего исследования численности и состава микромицетов, а также бактериологического состава микрофлоры почв Республики Татарстан.

Материалы и методика исследования. Цель работы – изучение влияния культур сосны на численность и состав микромицетов, а также бактериологический состав микрофлоры бывших пахотных почв Республики Татарстан.

Объектом исследования был комплекс микромицетов и бактерий почв, формирующихся после зарастания сельскохозяйственных угодий смешанными и чистыми древостоями сосны в Республике Татарстан.

Географическое расположение точек отбора проб охватывает несколько районов Татарстана: Бугульминский, Пестречинский, Высокогорский и Столбищенский. Эти территории находятся в лесостепной зоне Восточно-Европейской равнины, для которой характерен умеренно континентальный климат.

Предположительно, сосновые насаждения оказывают положительное влияние на восстановление плодородия бывших пахотных почв, увеличивая численность полезных микроорганизмов и снижая численность патогенов.

Результаты исследования.

На изученной территории преобладают чернозёмы и серые лесные почвы, которые формируются в условиях умеренного увлажнения и тёплого лета. Растительность типична для лесостепной зоны, с чередованием лиственных лесов (берёза, осина, дуб) и степных участков. В более влажных местах (например, у рек) растут ольха и ива.

Климат в районах отбора проб характеризуется как умеренно континентальный, с холодной зимой, тёплым летом и достаточным увлажнением. Эти условия способствуют формированию богатых почв и разнообразной растительности, что подтверждается данными о микробиологическом составе почв [Казеев и др., 2003].

Пробы почвы отбирали из бывшего пахотного и нижележащего горизонта в различных точках республики (табл. 1).

Далее приведены различия климатических условий по районам:

- Бугульминский район: континентальный климат с холодной зимой и жарким летом, малое количество осадков (около 450–500 мм в год);
- Пестречинский район: расположен ближе к Казани, климат немного мягче, больше осадков (до 550–600 мм в год);

- Высокогорский район: здесь холоднее, чем в других районах, снежный покров более устойчивый;
- Столбищенский район: климат близок к характерному для Пестречинского района, но количество осадков меньше.

Таблица 1

Точки отбора проб
Sampling points

Адрес	Координаты	Номера точек в эксперименте
Лаишевский р-н, рядом с с. Матюшенское	55.667293, 49.076157	5,7,8,
Лаишевский р-н, с. Столбище, культуры	55.652059, 49.142540	10,11
Лаишевский р-н, с. Песчаные-Ковали	55.637979, 49.114478	13
Высокогорский р-н, с. Берёзка	56.041838, 49.274522	6,12
Пестречинский р-н, с. Шигали	55.829028, 49.557128	2
Бугульминский р-н (участок 1)	54.402660, 52.785696	1,3
Бугульминский р-н, с. Петровка, Петровское уч. лесничество (участок 2)	54.402660, 52.785696	4,9

Определение численности групп микроорганизмов проводилось при помощи посева разведениями почвенных взвесей на плотных питательных средах:

- 1) аммонифицирующих – на мясо-пептонный агар (МПА);
- 2) амилолитических – на крахмал-аммиачный агар (КАА);
- 3) актиномицетов – на КАА;
- 4) микроскопических грибов (микромикетов) – на среду Чапека (рН 4,5) [Методы..., 1991].

Видовую идентификацию опасных для здоровья людей микромикетов (патогенов) проводили по определителям [Билай, Пидопличко, 1970; Методы..., 1991].

Кислотность почвы исследовали потенциометрически в водной и соляной вытяжке [Сатаева, 1990]. Статистическая обработка исходных данных осуществлялась в Программе STATISTICA 10 и по общепринятым методикам [Доспехов, 1985].

Основные результаты. В научных источниках данных о влиянии растений на микробное сообщество почвы крайне мало. Известно, что объем прижизненных растительных выделений в почву (ризоекссудатов) достигает 30-40% от общего объема продуктов фотосинтеза. Состав корневых экссудатов

значительно варьирует у растений разных семейств. Так, у злаков преобладают сахара и органические кислоты, у бобовых – аминокислоты и амиды. Известны разрозненные работы по влиянию растений на состав и структуру почвенного микробного сообщества [Гродзинский, 1991; Свистова, Парамонов, 2011], однако анализа направленности и степени выраженности эффекта растений разных семейств в доступной нам литературе мы не обнаружили.

Важным полифункциональным компонентом почвенной биоты является группа почвенных микроскопических грибов. Они принимают существенное участие в дистракционных процессах, протекающих в подзолистых почвах. Почвенные микромицеты доминируют среди микроорганизмов-целлюлозолитиков и составляют 60-90% целлюлозоразрушающей микробной биоты. В научной литературе имеются отдельные сообщения о выявлении в почве под монокультурами растений токсичных и опасных для человека видов грибов [Tedersoo et al., 2014]. Аналогичные закономерности наблюдаются и при преобразовании лесов в сельхозугодья в субтропическом Китае [Qin et al., 2014]. Роль микоризных ассоциаций в этих процессах подчеркивается в обзоре [Ye et al., 2025].

Результаты проведенных исследований по изучению влияния культур сосны на численность и состав микромицетов на бывших пахотных территориях Республики Татарстан представлены в табл. 2.

Таблица 2

Микромицеты. Состав и количество патогенов.

Micromycetes. Composition and number of pathogens

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
1	1.1 В под.	Бугульминский район, ЕВ с/х, прикопка №2	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Rhizopus</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень
	1.2 А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Rhizopus</i> sp. – плесень <i>Rhizoctonia</i> sp. – патоген ($2 \cdot 10^4$ КОЕ)
2	2.1 А под.	Пестречинский район, л/к	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень <i>Trichoderma</i> sp. – почв. деструктор <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ)
	2.2. А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($2,1 \cdot 10^4$ КОЕ) <i>Verticillium</i> sp. – патоген ($2,5 \cdot 10^4$ КОЕ) <i>Fusarium sporotrichoides</i> – патоген ($7,5 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Fusarium culmorum</i> – патоген ($5 \cdot 10^3$ КОЕ)

Продолжение табл. 2

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
3	3.1 А под.	Бугульминский район, ЕВ с/х участок №2, прикопка №2 у леса	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Humicola</i> sp. – почв. деструктор <i>Pythium</i> sp. – патоген ($5 \cdot 10^3$ КОЕ)
	3.2 А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Humicola</i> sp. – почв. деструктор <i>Pythium</i> sp. – патоген ($3 \cdot 10^3$ КОЕ)
4	4.1 В под., суглин.	Бугульминский район, ЕВ с/х участок №2, прикопка №1 у поля	<i>Penicillium</i> sp. – плесень
	4.2 В под., глина		<i>Penicillium</i> sp. – плесень
5	5.1 А ₁ песч.	Столбищенское, л/к проба №2	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Mucor</i> sp. – плесень <i>Bipolaris</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Pythium</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ)
	5.2 А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Rhizopus</i> sp. – плесень <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($1,9 \cdot 10^4$ КОЕ) <i>Bipolaris</i> sp. – патоген ($3 \cdot 10^3$ КОЕ)
6	6.1 В под.	Высокогорский район, проба №1	микромицетов не обнаружено
	6.2 А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Trichoderma</i> sp. – почв. деструктор <i>Rhizopus</i> sp. – плесень <i>Monocillium</i> sp. – плесень <i>Bipolaris</i> sp. – патоген $1 \cdot 10^3$ КОЕ <i>Pythium</i> sp. – патоген $1 \cdot 10^3$ КОЕ
7	7.1 А пах.	Столбищенское, ЕВ с/х, у вышки	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Ascochyta</i> sp. – патоген ($4 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Fusarium sporotrichoides</i> – патоген ($2 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Fusarium graminearum</i> – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ)
	7.2 В под.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Ascochyta</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Fusarium sporotrichoides</i> – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ)
8	8.1 А0 А1, середина рядов	Столбищенское, л/к, бывшее с/х, у вышки	<i>Bipolaris</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Alternatia</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ)
	8.2 А1 песч.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Bipolaris</i> sp. – патоген ($2,6 \cdot 10^4$ КОЕ) <i>Alternatia</i> sp. – патоген ($2,4 \cdot 10^4$ КОЕ)
	8.3 АВ под.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Trichoderma</i> sp. – почв. деструктор

Точка		Описание	Микромицеты. Состав и патогены
9	9.1 А пах., поле	Бугульминский район, ЕВ с/х,	<i>Penicillium</i> sp. – плесень
	9.2 В под.	участок №1, прикопка № 1	<i>Penicillium</i> sp. – плесень
10	10.1 А пах. у вышки	Столбищенское, ЕВ с/х, проба №1	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень <i>Humicola</i> sp. почв. деструктор <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($1 \cdot 10^3$ КОЕ) <i>Bipolaris</i> sp. – патоген ($2,6 \cdot 10^5$ КОЕ)
	10.2 А под. у леса		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Humicola</i> sp. – почв. деструктор
11	11.1 АВ под.	Столбищенское, л/к, бывшее с/х, проба №2, возле дороги	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень <i>Alternaria</i> sp. – патоген ($3 \cdot 10^3$ КОЕ)
	11.2 А0, А1		<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Aspergillus</i> sp. – плесень <i>Botrytis</i> sp. – патоген ($2 \cdot 10^4$ КОЕ) <i>Alternaria</i> sp. – патоген ($2,5 \cdot 10^4$ КОЕ)
12	12.1 А пах.	Высокогорский район, с/х, проба № 2	<i>Penicillium</i> sp. – плесень <i>Alternaria</i> sp. – патоген ($2 \cdot 10^3$ КОЕ)
	12.2 АВ под.		микромицетов не обнаружено
13	13.1 А под., суглин.	Верх., л/к	<i>Penicillium</i> sp. – плесень
	13.2 А пах.		<i>Penicillium</i> sp. – плесень

Примечание. В таблице использованы следующие сокращения: «под.» – подстильный горизонт; «пах.» – бывший пахотный горизонт; «с/х» – участок, ранее бывший сельскохозяйственным угодьем; «ЕВ» – естественное возобновление (леса); «л/к» – лесные культуры (искусственное насаждение); «верх.» – верхний почвенный горизонт (обычно А0–А1); «суглин.»/«глина»/«песч.» – гранулометрический состав почвы (суглинистый, глинистый, песчаный). Жирным шрифтом выделены патогены

Таким образом, по результатам проведенных микологических исследований разнообразие почвенных микромицетов в проанализированных образцах почвы насчитывает 16 видов, принадлежащих к одному из трех классов: Zygomycetes, Ascomycetes, Nuromycetes. Эти цифры свидетельствуют о том, что, несмотря на значительное разнообразие гидротермических и почвенных условий, разнообразие изучаемой почвенной микрофлоры совсем не велико.

Для выявленной нами почвенной биоты характерны многочисленность различных форм мицелия; преобладание пенициллов по численности и видовому разнообразию (5 видов из 16, т. е. около трети от общего количества); единичное присутствие муковых грибов и видов из рода *Trichoderma*. При этом 9 из 16 видов представлены патогенами, наиболее распространенные из них – *Rhizoctonia* sp., *Botrytis* sp., *Bipolaris* sp., *Alternaria* sp.

Разнообразие и количество патогенов в анализируемых пробах почвы представлено на рис. 1. Как видно из представленных данных, максимальное количество патогенов обнаружено в бывших пахотных горизонтах (образцы 1.2, 2.2, 5.2, 7.1, 10.1). Однако в бывших пахотных горизонтах почв с более тяжелым гранулометрическим составом повышения количества патогенов не отмечено, или их количество не существенно (образцы 3.2, 4.2, 6.2, 8.2, 9.1, 12.1 и 13.2). Предположительно, это связано с тем, что Республика Татарстан расположена в пределах двух природных зон – лесной и лесостепной. Серые лесные почвы являются характерными для физико-географических и биоклиматических условий Республики Татарстан и занимают около 40% площади сельхозугодий [Казеев и др., 2003; Газизуллин, 2005; de Vries, 2012].

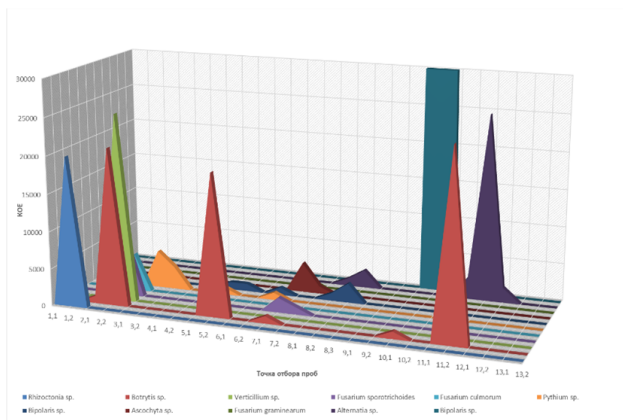


Рис. 1. Разнообразие и количество патогенов в отобранных образцах почв
 Fig. 1. Diversity and number of pathogens in the collected soil samples

Общее разнообразие микромицетов также было выше в образцах бывших пахотных почв. Максимально разнообразный микробиом отмечен в

вариантах 2.2, 5.2, 6.2, 7.1, 10.1, 11.2, т. е. именно в бывших пахотных горизонтах большинства исследованных участков.

Отмеченная тенденция, основана на значительном улучшении агрохимических характеристик почв, используемых для выращивания сельскохозяйственных культур. Под влиянием внесенных органических и минеральных удобрений, а также под воздействием ранее проводимых мелиоративных мероприятий, положительно влиявших на структуру и уровень плодородия почв, закономерно произошло расширение и усложнение микробного сообщества, что мы смогли пронаблюдать на примере отобранных проб.

Помимо анализа микромицетов в отобранных почвенных образцах были проанализированы структура и численность бактериологического сообщества (результаты представлены в табл. 3).

Микробиологические параметры почв очень чувствительны к изменению внешних условий, в том числе к антропогенному прессингу, но одновременно отличаются высокой вариабельностью в пространстве и изменчивостью во времени [Казеев и др., 2003; Soria et al., 2025]. Полученные в исследовании данные это подтверждают. Для наглядности отразим данные табл. 3 в виде диаграммы (рис. 2).

Некоторые бактерии (*Bacillus* sp.) демонстрируют высокую адаптивность, встречаясь практически во всех точках, в то время как другие (*Pseudomonas* sp.) имеют более ограниченное распространение.

Далее рассмотрим указанные тенденции подробнее. Прежде чем анализировать данные, представленные в табл. 3, следует немного углубиться в понимание особенностей формирования микробного сообщества в почвах.

Биомасса микроорганизмов характеризует состояние почвенных условий в целом, так как трофические цепи внутри почвы формируются под влиянием климата местности, количества и качества органического опада и отпада, степени и направленности антропологического воздействия [Казеев и др., 2003; Звягинцев и др., 2005].

Микроорганизмы, встречающиеся в проанализированных образцах, играют важную роль в экосистемах почвы, способствуя различным процессам, которые поддерживают здоровье и продуктивность почвы. Ниже приводится краткое описание их функций:

- *Bacillus* sp.: эти бактерии участвуют в разложении органических веществ, способствуя минерализации питательных веществ и улучшая структуру почвы. Некоторые виды также обладают антибактериальными свойствами и могут подавлять патогены;

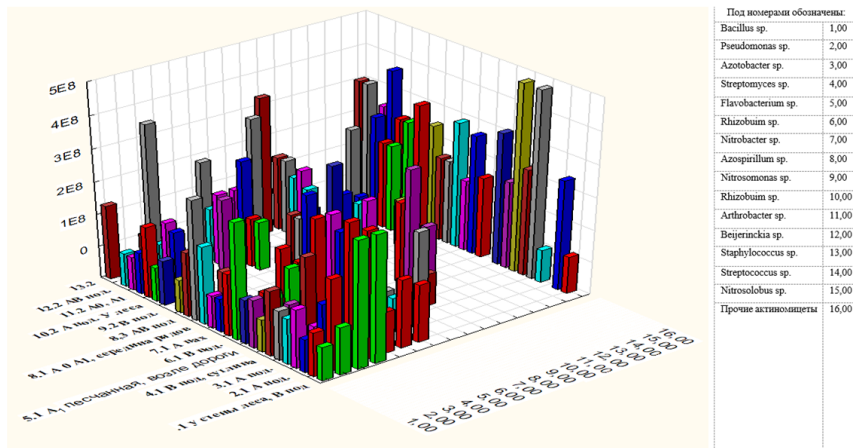


Рис. 2. Бактериологический анализ почв
Fig. 2. Bacteriological analysis of soils

- *Pseudomonas* sp.: эти бактерии известны своей способностью к разложению различных органических веществ и токсинов, а также участвуют в процессе биологического азотфиксирования. Они могут фиксировать атмосферный азот и производить фитогормоны, способствуя росту растений;
- *Azotobacter* sp.: это свободноживущие бактерии, которые фиксируют атмосферный азот и делают его доступным для растений. Они также участвуют в разложении органических веществ;
- *Streptomyces* sp.: эти актиномицеты играют важную роль в разложении органических веществ. Они могут продуцировать антибиотики, подавляющие рост патогенных микроорганизмов в почве;
- *Flavobacterium* sp.: эти бактерии участвуют в разложении сложных органических веществ и играют роль в углеродном цикле, способствуя минерализации углерода;
- *Rhizobium* sp.: эти бактерии образуют симбиотические отношения с бобовыми растениями, фиксируя атмосферный азот в корнях растений и обогащая почву питательными веществами;
- *Nitrobacter* sp.: эти бактерии участвуют в процессе нитрификации, превращая нитриты в нитраты, которые являются доступными формами азота для растений;
- *Azospirillum* sp.: эти бактерии также фиксируют атмосферный азот и способствуют увеличению роста растений, а также улучшают усвоение ими питательных веществ;

- *Nitrosomonas* sp.: эти бактерии являются первичными нитрификаторами, которые окисляют аммоний до нитритов, участвуя в процессе нитрификации;

- *Arthrobacter* sp.: эти бактерии разлагают сложные органические соединения, способствуя минерализации питательных веществ и улучшая биологическую активность почвы;

- *Beijerinckia* sp.: эти бактерии способны фиксировать атмосферный азот и участвуют в разложении органических веществ, улучшая плодородие почвы;

- *Staphylococcus* sp.: некоторые виды этих бактерий могут быть патогенными, но также участвовать в разложении органических веществ и поддержании микробиологического баланса в почве;

- *Streptococcus* sp.: эти бактерии могут участвовать в разложении органических веществ и поддержании микробиологического баланса в почве;

- *Nitrosolobus* sp.: эти бактерии также участвуют в нитрификации, превращая аммоний в нитриты, что является важным этапом в цикле азота.

Таким образом, перечисленные микроорганизмы выполняют различные функции, включая разложение органических веществ, фиксацию азота, нитрификацию и подавление патогенов, что делает их важными для здоровья и плодородия почвы.

Для того чтобы оценить, как различаются условия в верхнем и бывшем пахотном горизонтах, посчитаем коэффициент корреляции Пирсона (табл. 4, 5). Это позволит оценить, есть ли взаимосвязи между численностью разных микроорганизмов в каждом горизонте. Однако для полного анализа данных недостаточно, поэтому в таблицах приведена корреляция для тех групп, в которых было необходимое количество данных.

По полученным результатам хорошо видна взаимосвязь между некоторыми бактериями. Это, скорее всего, обусловлено влиянием сходных условий и/или участием данных микроорганизмов в одной трофической цепочке. Наиболее сильные взаимосвязи отмечены в верхнем горизонте между *Bacillus* sp. и *Azotobacter* sp. и *Azotobacter* sp. и прочими актиномицетами; в нижнем горизонте – между *Bacillus* sp. и *Azotobacter* sp., а также *Rhizobium* sp. и *Nitrobacter* sp., что, по-видимому, связано с активностью азотного цикла в данном горизонте. Поскольку не все данные соответствуют требованиям, необходимым при расчёте корреляции Пирсона, далее, для уточнения полученных зависимостей, мы применим корреляцию Спирмена (табл. 6, 7).

Таблица 4

Корреляционный анализ по образцам из верхнего горизонта

Correlation analysis for samples from the upper horizon

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент корреляции (r)	Интерпретация
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Pseudomonas</i> sp.	0,45	Умеренная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,78	Сильная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,32	Слабая положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,61	Умеренная положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,28	Слабая положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,67	Умеренная положительная связь
<i>Rhizobium</i> sp.	<i>Nitrobacter</i> sp.	0,53	Умеренная положительная связь
<i>Arthrobacter</i> sp.	Прочие актиномицеты	0,71	Сильная положительная связь

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа в бывшем пахотном горизонте

Results of correlation analysis in the former arable horizon

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент корреляции (r)	Интерпретация
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Pseudomonas</i> sp.	0,12	Слабая положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,65	Умеренная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,41	Умеренная положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,34	Слабая положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,19	Слабая положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,58	Умеренная положительная связь
<i>Rhizobium</i> sp.	<i>Nitrobacter</i> sp.	0,62	Умеренная положительная связь
<i>Arthrobacter</i> sp.	Прочие актиномицеты	0,69	Сильная положительная связь

Данный анализ подтвердил ранее выявленные зависимости. В обоих проанализированных горизонтах наблюдается положительная корреляция между микроорганизмами, участвующими в азотном цикле (*Azotobacter* sp., *Rhizobium* sp., *Nitrobacter* sp.), а в верхнем горизонте сильнее выражены связи между микроорганизмами, участвующими в разложении органики (*Streptomyces* sp., прочие актиномицеты).

Таблица 6

Результаты корреляционного анализа Спирмена (верхний горизонт)

Results of Spearman correlation analysis (upper horizon)

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент Спирмена	Интерпретация
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Pseudomonas</i> sp.	0,45	Умеренная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,78	Сильная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,32	Слабая положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Flavobacterium</i> sp.	0,12	Слабая положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,61	Умеренная положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,28	Слабая положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,67	Умеренная положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Flavobacterium</i> sp.	0,05	Корреляция отсутствует
<i>Rhizobium</i> sp.	<i>Nitrobacter</i> sp.	0,53	Умеренная положительная связь
<i>Arthrobacter</i> sp.	Прочие актино-мицеты	0,71	Сильная положительная связь
<i>Nitrosomonas</i> sp.	<i>Beijerinckia</i> sp.	0,08	Слабая положительная связь
<i>Staphylococcus</i> sp.	<i>Streptococcus</i> sp.	0,03	Корреляция отсутствует

Таблица 7

Результаты корреляционного анализа Спирмена (бывший пахотный горизонт)

Results of Spearman correlation analysis (former arable horizon)

Микроорганизм 1	Микроорганизм 2	Коэффициент Спирмена	Интерпретация
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Pseudomonas</i> sp.	0,12	Слабая положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,65	Умеренная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,41	Умеренная положительная связь
<i>Bacillus</i> sp.	<i>Flavobacterium</i> sp.	0,10	Слабая положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Azotobacter</i> sp.	0,34	Слабая положительная связь
<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,19	Слабая положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Streptomyces</i> sp.	0,58	Умеренная положительная связь
<i>Azotobacter</i> sp.	<i>Flavobacterium</i> sp.	0,07	Корреляция отсутствует
<i>Rhizobium</i> sp.	<i>Nitrobacter</i> sp.	0,62	Умеренная положительная связь
<i>Arthrobacter</i> sp.	Прочие актино-мицеты	0,69	Сильная положительная связь
<i>Nitrosomonas</i> sp.	<i>Beijerinckia</i> sp.	0,06	Корреляция отсутствует
<i>Staphylococcus</i> sp.	<i>Streptococcus</i> sp.	0,04	Корреляция отсутствует

Интересно и наличие в нескольких пробах редких микроорганизмов (например, *Flavobacterium* sp., *Nitrosomonas* sp.) однако анализ их роли в микробном сообществе требует дополнительных данных о плодородии и почвенном покрове на изучаемых объектах и будет произведен в следующих статьях по данным объектам.

Обсуждение. Проведенный анализ образцов позволяет разделить все пробы почв на несколько групп:

1. В образцах 1, 2, 3, 6 и 12 отмечено более высокое содержание азотфиксирующих бактерий, что влияет на плодородие почв и указывает на положительную динамику наблюдаемых процессов; наличие актиномицетов говорит об активном разложении органики и, по-видимому, активном процессе гумусообразования;

2. В образцах 4,5,7,8 10 и 11, скорее всего, процессы гумусообразования идут медленнее, чем в вышеописанных образцах. Это связано с обилием *Bacillus* sp. и *Pseudomonas* sp., которые часто встречаются в почвах с умеренным содержанием органического вещества;

3. Не очень понятно, какие процессы можно зафиксировать в пробах 9 и 13, так как там мало микроорганизмов и встречаются редкие виды;

4. Отдельно стоит отметить точки 4 и 6: в них есть горизонты с высокой численностью редких микроорганизмов (*Nitrosolobus* sp., *Beijerinckia* sp.). Это может быть связано с уникальными условиями (например, близость к реке или специфический состав почвы).

По собранным данным легко выявить и различия процессов, происходящих в верхнем и нижележащем горизонтах:

1. В верхних горизонтах микроорганизмов, разлагающих органику, больше, чем в нижнем;

2. Бактерии, участвующие в азотном цикле, чаще встречаются в бывшем пахотном горизонте, что предположительно связано с внесением в него питательных веществ в процессе эксплуатации заброшенной пашни;

3. Увеличение численности микроорганизмов, связанных с азотным циклом (*Nitrobacter* sp., *Nitrosomonas* sp.), отмечено в обоих горизонтах (в верхнем сильнее), что говорит о процессах саморемедиации почвы;

4. В некоторых точках (6, 12) численность микроорганизмов в бывшем пахотном слое близка к таковой в верхнем горизонте, что может свидетельствовать о более активном восстановлении.

Заключение. В ходе исследования состава почвенной биоты мы смогли пронаблюдать картину постепенной саморемедиации бывших пахотных почв

после их исключения из активного сельскохозяйственного пользования. Так, часто встречающиеся в образцах актиномицеты и бактерии, участвующие в азотном цикле, играют ключевую роль в разложении и преобразовании органического вещества. Их высокая численность в верхнем горизонте указывает на активное формирование лесной почвы. Встретились в образцах и более редкие микроорганизмы, например, *Flavobacterium* sp., только в одной пробе (точка 1, бывший пахотный слой). Это может указывать на специфические условия в этой точке (например, повышенная влажность).

Видимо, на заброшенных сельскохозяйственных угодьях в ходе зарастания лесом происходит постепенное восстановление почвенной микрофлоры. Верхний горизонт характеризуется активным разложением органического вещества, в то время как бывший пахотный слой восстанавливает свои функции, связанные с азотным циклом, что важно для формирования устойчивой лесной экосистемы.

Исследование на данный момент продолжается: идет анализ структуры древостоя, закончено определение агрохимических показателей, проанализированных образцов, а также проанализирован состав растительных сообществ на местах отбора проб. Данные, полученные в этих исследованиях, будут проанализированы и лягут в основу следующих статей по данным объектам.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Билай В.И., Пидопличко Н.М. Токсинообразующие микроскопические грибы и вызываемые ими заболевания человека и животных. Киев: Наукова думка, 1970. 299 с.

Газизуллин А.Х. Почвенно-экологические условия формирования лесов Среднего Поволжья. Т. 1: Почвы лесов Среднего Поволжья, их генезис, систематика и лесорастительные свойства. Казань: Школа, 2005. 495 с.

Гримберг А.А. Использование и охрана земельных ресурсов на региональном уровне // Экономика и экология территориальных образований. 2015. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-i-ohrana-zemelnyh-resursov-na-regionalnom-urovne> (дата обращения: 01.03.2025)

Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1991. 429 с.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 351 с.

Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: МГУ, 2005. 445 с.

Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов-н/Д: РГУ, 2003. 202 с.

Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1991. 302 с.

Мохамед Х.А. Ассоциативная азотфиксация в ризосфере различия сортов риса: дис. ... канд. биол. наук. М., 1988. 240 с.

Сатаева Л.В. Применение статистических методов к решению некоторых вопросов мониторинга загрязнения почв: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 1990. 277 с.

Свистова И.Д., Парамонов А.Ю. Влияние лекарственных растений на микромицеты и биологическую активность почвы // Проблемы медицинской микологии. 2011. Т. 13, №3. С. 50-53.

Qin H., Wang H., Strong P.J., Li Y., Xu Q., Wu Q. Rapid soil fungal community response to intensive management in a bamboo forest developed from rice paddies // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 68. P. 177-184. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.09.031.

Soria R., de la Rosa J.M., González-Pérez J.A., Bastida, F., Ortega R., Miralles I. Assessing organic amendments for improving SOM dynamics and microbial functioning in degraded quarry soils // Environmental Technology and Innovation. 2025. Vol. 39. Art. no. 104323. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104323.

Tedersoo L., Bahram M., Põlme S., Kõljalg U., Yorou N.S., Wijesundera R., Villarreal Ruiz L., Vasco-Palacios A.M., Quang Thu P., Suija A., Smith M.E., Sharp C., Saluveer E., Saitta A., Rosas M., Riit T., Ratkowsky D., Pritsch K., Põldmaa K., Piepenbring M., Phosri C., Peterson M., Parts K., Pärtel K., Otsing E., Nouhra E., Njouonkou A.L., Nilsson R.H., Morgado L.N., Mayor J., May T.W., Majuakim L., Lodge D.J., See Lee S., Larsson K.-H., Kohout P., Hosaka K., Hiiesalu I., Henkel T.W., Harend H., Guo L., Greslebin A., Grelet G., Geml J., Gates G., Dunstan W., Dunk C., Drenkhan R., Dearnaley J., De Kesel A., Dang Tan, Chen Xin, Buegger F., Brearley F.Q., Bonito G., Anslan S., Abell S., Abarenkov K. Global diversity and geography of soil fungi // Science. 2014. Vol. 346, iss. 6213. Art. no. 1256688. DOI: 10.1126/science.1256688.

Toledo S., Martínez Pastur G., Rodríguez Souilla J., Peri P.L. Effects of land use types and spatial heterogeneity on soil microbial biomass and activity along environmental gradients in Austral ecosystems // Total Environment Microbiology. 2025. Vol. 1, iss. 3. Art. no. 100028. DOI: 10.1016/j.temicr.2025.100028.

Ye Z., Zhu X., Zhi Y., Lin H., Wu J. The role of forest mushroom systems in soil fungal community reorganization and carbon fractions // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2025. Vol. 397. Art. no. 110073. DOI: 10.1016/j.agee.2025.110073.

References

Bilai V.I., Pidoplichko N.M. Toxiniforming Microscopic Fungi and Diseases Caused by Them in Humans and Animals. Kyiv: Naukova Dumka, 1970. 299 p. (In Russ.)

Dospekhov B.A. Field Experiment Methodology. Moscow: Kolos, 1985. 351 p. (In Russ.)

Gazizullin A.Kh. Soil-Environmental Conditions for Forest Formation in the Middle Volga Region: Soils of Middle Volga Forests, Their Genesis, Systematics, and Forest-Planting Properties. Kazan: Shkola, 2005. 495 p. (In Russ.)

Grimberg A.A. Use and conservation of land resources at the regional level. *Economy and ecology of territorial formations*, 2015, no. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-i-ohrana-zemelnyh-resursov-na-regionalnom-urovne> (accessed: 01.03.2025). (In Russ.)

Grodzinsky A.M. Allelopathy of Plants and Soil Fatigue. Kyiv: Naukova Dumka, 1991. 429 p. (In Russ.)

Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. Biological Diagnostics and Soil Indicators: Methodology and Research Methods. Rostov-on-Don: RSU, 2003. 202 p. (In Russ.)

Methods in Soil Microbiology and Biochemistry. Moscow: MSU, 1991. 302 p. (In Russ.)

Mohamed Kh.A. Associative Nitrogen Fixation in Rhizosphere Differences among Rice Varieties. Diss. ... Cand. Biol. Sci. Moscow, 1988. 240 p. (In Russ.)

Qin H., Wang H., Strong P.J., Li Y., Xu Q., Wu Q. Rapid soil fungal community response to intensive management in a bamboo forest developed from rice paddies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, vol. 68, pp. 177-184. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.09.031.

Sataeva L.V. Application of Statistical Methods to Solve Certain Soil Pollution Monitoring Issues. Diss. ... Cand. Phys.-Math. Sci. Obninsk, 1990. 232 p. (In Russ.)

Soria R., de la Rosa J.M., González-Pérez J.A., Bastida, F., Ortega R., Miralles I. Assessing organic amendments for improving SOM dynamics and microbial functioning in degraded quarry soils. *Environmental Technology and Innovation*, 2025, vol. 39, art. no. 104323. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104323.

Svistova I.D., Paramonov A.Yu. Influence of Medicinal Plants on Micromycetes and Soil Biological Activity. *Problems in Medical Mycology*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 50-53. (In Russ.)

Tedersoo L., Bahram M., Põlme S., Kõljalg U., Yorou N.S., Wijesundera R., Villarreal Ruiz L., Vasco-Palacios A.M., Quang Thu P., Suija A., Smith M.E., Sharp C., Saluveer E., Saitta A., Rosas M., Riit T., Ratkowsky D., Pritsch K., Põldmaa K., Piepenbring M., Phosri C., Peterson M., Parts K., Pärtel K., Otsing E., Nouhra E., Njouonkou A.L., Nilsson R.H., Morgado L.N., Mayor J., May T.W., Majuakim L., Lodge D.J., See Lee S., Larsson K.-H., Kohout P., Hosaka K., Hiiesalu I., Henkel T.W., Harend H., Guo L., Greslebin A., Grelet G., Geml J., Gates G., Dunstan W., Dunk C., Drenkhan R., Dearnaley J., De Kesel A., Dang Tan, Chen Xin, Buegger F., Brearley F.Q., Bonito G., Anslan S., Abell S., Abarenkov K. Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 2014, vol. 346, iss. 6213, art. no. 1256688. DOI: 10.1126/science.1256688.

Toledo S., Martínez Pastur G., Rodríguez Souilla J., Peri P.L. Effects of land use types and spatial heterogeneity on soil microbial biomass and activity along

environmental gradients in Austral ecosystems. *Total Environment Microbiology*, 2025, vol. 1, iss. 3, art. no. 100028. DOI: 10.1016/j.temicr.2025.100028.

Ye Z., Zhu X., Zhi Y., Lin H., Wu J. The role of forest mushroom systems in soil fungal community reorganization and carbon fractions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, vol. 397, art. no. 110073. DOI: 10.1016/j.agee.2025.110073.

Zvyagintsev D.G., Babieva I.P., Zenova G.M. *Soil Biology*. Moscow: MSU, 2005. 445 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.05.2025

Гибадуллин Н.Ф., Дурова А.С., Семенова Е.И., Гайфуллин И.И. Изучение структуры и состава микробных сообществ, формирующихся в процессе зарастания лесом бывших пахотных почв Республики Татарстан // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 363–382. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.363-382*

В данной работе представлен подробный анализ микробного сообщества почв Республики Татарстан, сформировавшегося под воздействием различных типов растительности — смешанных и чистых сосновых сообществ — на бывших пахотных землях. Образцы почвы собраны как из верхнего горизонта, так и с ранее используемого пахотного слоя, что позволяет оценить изменения в микробной структуре в зависимости от исторического использования земли. Исследование направлено на выявление взаимосвязей между различными группами микроорганизмов, участвующих в азотном цикле и разложении органического вещества, а также на определение их роли в процессе восстановления плодородия почвы. Для анализа использовались методы корреляционного анализа с применением коэффициентов Пирсона и Спирмена, что позволило выявить наличие умеренных и сильных положительных связей между микроорганизмами. Эти связи свидетельствуют о сходных условиях среды и их участии в одной трофической цепочке. В результате исследования были выделены несколько групп образцов, характеризующихся различной численностью азотфиксирующих бактерий и актиномицетов, что отражает динамику гумусообразования и изменения уровня плодородия почвы. Работа подчеркивает важность микробного сообщества в процессе саморемедиации почвы после прекращения сельскохозяйственного использования. Установленные взаимосвязи между микроорганизмами и их роль в восстановлении экосистемы открывают новые перспективы для дальнейших исследований, включая изучение структуры древостоя и агрохимических показателей почвы. Полученные данные будут использованы в будущих публикациях для более глубокого понимания комплексных изменений в заброшенных сельскохозяйственных угодьях.

Ключевые слова: сельскохозяйственные земли, микромицеты, освоение заброшенных земель, культуры сосны.

Gibadullin N.F., Durova A.S., Semenova E.I., Gaifullin I.I. Study of the structure and composition of microbial communities formed during the process of forest overgrowth of former arable soils in the Republic of Tatarstan. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 363–382 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.363-382

This study presents a detailed analysis of the soil microbial community in the Republic of Tatarstan, which has developed under the influence of different types of vegetation—mixed and pure pine communities—on former arable lands. Soil samples were collected from both the upper horizon and the previously cultivated layer, allowing for an assessment of changes in microbial structure depending on land use history. The research aims to identify relationships between various groups of microorganisms involved in the nitrogen cycle and organic matter decomposition, as well as their roles in soil fertility recovery processes. Correlation analysis using Pearson’s and Spearman’s coefficients revealed moderate to strong positive relationships among microorganisms. These connections indicate similar environmental conditions and participation in a common trophic chain. As a result of the study, several groups of samples were distinguished based on differing populations of nitrogen-fixing bacteria and actinomycetes, reflecting the dynamics of humus formation and changes in soil fertility levels. The work emphasizes the importance of microbial communities in soil self-remediation after cessation of agricultural use. The established relationships between microorganisms and their roles in ecosystem restoration open new avenues for further research, including studies on forest structure and agrochemical soil indicators. The obtained data will be utilized in future publications to deepen understanding of complex changes occurring in abandoned agricultural lands.

Key words: agricultural lands, micromycetes, reclamation of abandoned lands, pine cultivation.

ГИБАДУЛЛИН Нурсиль Фоатович – участковый лесничий Матюшинского участкового лесничества Пригородного лесничества г. Казани, доцент кафедры лесоводства и лесных культур факультета лесного хозяйства и экологии Казанского государственного аграрного университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4388-8244.

420111, ул. Лесная, д. 15, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: karina.klimakova@icloud.com

GIBADULLIN Nursil F. – PhD (Agriculture), district forester in Matyushinskoye district forestry, Prigorodnoye forestry of Kazan, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Cultures, Kazan State Agrarian University. SPIN-code: 4388-8244.

420111. Lesnaya str. 15. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: karina.klimakova@icloud.com

ДУРОВА Анастасия Сергеевна – доцент кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 7073-0332. ORCID: 0000-0001-7234-920X.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. А, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: soilbox@mail.ru

DUROVA Anastasia S. – PhD (Agricultural), Associate Professor of Silviculture Department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7073-0332. ORCID: 0000-0001-7234-920X.

194021. Institute per. 5A. St. Petersburg. Russia. E-mail: soilbox@mail.ru

СЕМЕНОВА Екатерина Игоревна – младший научный сотрудник НИО мониторинга лесных экосистем Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 21.01.1990@mail.ru

SEMENOVA Ekaterina I. – Junior Researcher at the Scientific Research Department of Forest Ecosystem Monitoring, St. Petersburg Scientific Research Institute of Forest Management PhD student at St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: 21.01.1990@mail.ru

ГАЙФУЛЛИН Ильдар Ильфатович - руководитель ООО Метро Кэш энд Керри.

193091, ул. Ультрамариновая д. 10, Санкт-Петербург. E-mail: Pimenta.spb@icloud.com

GAIFULLIN Idar I. – Head of LLC «Metro Cash & Carry»

193091. Ultramarinovaya str. 10. St. Petersburg. E-mail: Pimenta.spb@icloud.com