

Микробная трансформация органического вещества дерново-подзолистой почвы Предуралья при различном использовании и внесении минеральных удобрений

© 2019. Н. Е. Завьялова¹, д. б. н., зав. лабораторией,
И. Г. Широких^{2,3}, д. б. н., профессор,
А. И. Косолапова¹, д. с.-х. н., гл. н. с., А. А. Широких^{2,3}, д. б. н., профессор,
¹Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения академии наук,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, 13 а,
²ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166 а,
³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,
e-mail: nezavyalova@gmail.com, irgenal@mail.ru

Исследованы микробиологические показатели и характер трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы по окончании пяти ротаций восьмипольного севооборота в длительном стационарном полевом опыте (1978–2017 гг.). Определена направленность микробиологических процессов, обусловленная воздействием длительного внесения минеральных удобрений в возрастающих дозах – от (НПК)30 до (НПК)150 кг д.в./га. Проведено сравнение пахотной почвы с её целинными аналогами под непосредственно примыкающими к опытному полю смешанным лесом и естественным злаково-разнотравным лугом, а также с почвой под сеяным травостоем козлятника восточного (*Galegae orientalis* L.). Установлено, что различное использование дерново-подзолистой почвы привело к изменению направленности почвенных микробных процессов. Распахивание почвы снизило содержание общего гумуса и увеличило количество и разнообразие актиномицетов, принимающих участие в минерализации полуразложившихся растительных остатков – детрита. В вариантах с внесением минеральных удобрений под зерновые культуры севооборота в дозах (НПК) 90 – 150 кг д.в./га наблюдали сохранение исходного содержания гумуса и снижение индексов педотрофности по сравнению с целинными аналогами и пахотной почвой без удобрений или получавшей удобрения в низких дозах. При длительном возделывании многолетней бобовой культуры козлятника восточного без внесения удобрений в почве создаются благоприятные условия для формирования микробного ценоза, по количественным и качественным показателям близкого к микробоценозу целинной почвы, стабилизируется её гумусное состояние.

Ключевые слова: эколого-трофические группы, микроорганизмы, севооборот, целина, *Galegae orientalis* L., минеральные удобрения, гумус.

Microbial transformation of organic matter of sod-podzolic soils in the Pre-Urals under conditions of different use and application of mineral fertilizers

© 2019. N. E. Zavyalova¹ ORCID 0000-0003-4005-8998, I. G. Shirokikh^{2,3} ORCID 0000-0002-3319-2729,
A. I. Kosolapova¹ ORCID 0000-0002-9929-4488, A. A. Shirokikh^{2,3} ORCID 0000-0002-7808-0376,
¹Perm Federal research centre Ural branch of the Academy of Sciences,
13a, Lenina St., Perm, Russia, 614990,
²Federal Scientific Agricultural Center of the North-East,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: nezavyalova@gmail.com, irgenal@mail.ru

Microbiological parameters and character of transformation of humic substances of sod-podzolic soil at the end of five rotations of eight-full crop rotation in long-term stationary field experiment (1978–2017) are investigated. The direction of microbiological processes due to the effect of long-term application of mineral fertilizers in increasing doses – 30 to 150 kg/ha of NPK was determined. A comparison of the arable soil with its virgin analogs (mixed forest and natural meadow) as well as with the planting of goatling (*Galegae orientalis* L.). It was found that the different use of sod-podzolic soil led to a change in the direction of soil microbial processes. Plowing the soil reduced the content of total humus and increased the number and variety of actinomycetes involved in the mineralization of semi-decomposed plant residues, i. e. detritus. In the variants with application of mineral fertilizers for cereal crops in doses 90–150 kg/ha of NPK it was observed the preservation of the original content of humus and a decrease of the index of pedotrophy compared to virgin counterparts and arable soil without fertilizers or treated with fertilizer in low doses. With the long-term cultivation of perennial leguminous culture without applying fertilizers, a microbial community is formed in the soil which is close in terms of quantitative and qualitative indicators to the microbial community of virgin soil analogs and its humus state is stabilized.

Keywords: ecological and trophic groups, microorganisms, crop rotation, virgin soil analogs, *Galegae orientalis* L., mineral fertilizers, humus.

Органическое вещество почвы – это совокупность живой биомассы и органических остатков растений, животных и микроорганизмов, продуктов их метаболизма и специфических новообразованных органических веществ почвы – гумуса. Содержание гумуса и запасы органического вещества являются традиционными показателями плодородия и экологической устойчивости почвы [1]. Концентрируя и перераспределяя энергию солнца, органическое вещество обеспечивает жизнедеятельность почвенных организмов, выполняющих значительную механическую работу, а также биохимические и химические реакции, составляющие основу почвообразования. Гумус является одновременно аккумулятором и источником энергии для протекающих в почве процессов, поддерживая нормальный обмен и круговорот энергии и вещества в агроландшафте [2].

Содержание гумусовых веществ в почве зависит от количества и состава поступающих органических остатков, скорости их гумификации и минерализации. Приходная часть гумусового баланса в агроэкосистемах складывается в основном за счёт гумификации растительных остатков (пожнивных и корневых) и внесения органических удобрений. Поступающее в почву органическое вещество перерабатывается в трофических цепях, конечным деструктивным звеном которых являются микроскопические грибы и бактерии. Они осуществляют минерализацию органических веществ с возвратом углекислого газа в атмосферу.

Одновременно с деструкцией микроорганизмы участвуют в процессах гумификации: синтезируют соединения, которые служат структурными компонентами молекул гумусовых веществ, а также производят фенолоксидазы, которые окисляют полифенолы до

хинонов с последующей конденсацией в гумус [3, 4]. Гумификация, по В. И. Вернадскому, представляет собой один из важнейших биосферных процессов, поскольку позволяет сохранить баланс между минерализацией и консервацией органических остатков, необходимых для стабильного существования биоты, обеспечивая единство «живого и гумуса» [5].

В последние десятилетия для большинства почв сельскохозяйственных угодий большое значение приобрела проблема, связанная с увеличением интенсивности разложения органического вещества почв и развитием процессов дегумификации. Основная причина дегумификации окультуренных почв – применение систем земледелия, которые не могут обеспечить положительный или бездефицитный баланс питательных веществ и гумуса. Отрицательный годовой баланс гумуса крайне опасен в экологическом отношении, поскольку гумус – один из главных аккумуляторов солнечной энергии на поверхности Земли и гарант продуктивности, обеспечивающий экологическую устойчивость биосферы в целом [2, 6].

В России проблему дегумификации почв связывают со снижением уровня агротехники в период экономической дестабилизации и отсутствием контроля за биологическими и биохимическими процессами в почве. В случае непринятия необходимых превентивных мер в ближайшем будущем потери гумуса могут стать экологическим бедствием. Для разработки мер, препятствующих развитию этой негативной тенденции, необходимы исследования, направленные на выявление связей между направленностью процессов трансформации органического вещества почвы и её микробиологическими показателями.

Действие различных биологических и агротехнических факторов на плодородие

почвы и продуктивность растений становится очевидным, как правило, лишь по истечении десятков лет [7–9]. Поэтому особую ценность представляют исследования, выполненные в длительных (более 20 лет) полевых стационарах. В условиях длительного стационара действие изучаемого фактора аккумулируется во времени на фоне изменения факторов окружающей среды, что позволяет решать специфические проблемы земледелия и экологии для конкретной почвенно-климатической зоны.

Цель данной работы – получение и сопоставление информации о состоянии микробных ценозов и гумуса в целинных и пахотных дерново-подзолистых почвах Предуралья, в том числе при внесении минеральных удобрений.

Объекты и методы

Изучение процессов трансформации органического вещества и количественного состава эколого-трофических групп микроорганизмов проводили в почве длительного стационарного опыта, заложенного в 1978 г. на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве опытного поля Пермского Федерального исследовательского центра УрО РАН. Схема опыта включала следующие варианты длительного применения возрастающих доз полного минерального удобрения (кг д.в./га): 1. Без удобрений (контроль); 2. (NPK)30; 3. (NPK)60; 4. (NPK)90; 5. (NPK)120; 6. (NPK)150. Размещение вариантов рендомизированное. Общая площадь делянки 120 м², учётная – 76,4 м². В качестве удобрений использовали аммиачную селитру или мочевины, простой суперфосфат и хлористый калий.

Образцы почвы отбирали на глубине 0–20 см по окончании пяти ротаций восьмипольного севооборота, на двух не смежных повторениях после уборки последней культуры севооборота – овса (*Avena sativa* L.) сорта Стайер.

Пахотные почвы сравнивали с целинной дерново-подзолистой почвой на непосредственно примыкающих к опытному полю института стационарных участках под смешанным лесом, злаково-разнотравным лугом, а также с бессменным посевом многолетней бобовой культуры – козлятника восточного (*Galegae orientalis* L.) сорта Гале. Посев козлятника с 1988 г. не удобряется, но используется для получения семян. Солома после уборки семян отчуждается. Образцы почвы

на этих участках отбирали на ту же глубину и в те же сроки (в первой декаде сентября), что и на делянках полевого севооборота.

Для оценки направленности и интенсивности процессов трансформации органического вещества в образцах почв проводили определение комплекса наиболее информативных показателей состояния почвы в соответствии с общепринятыми методами: гумус – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО, общий азот – по Къельдалю, трудно- и легкогидролизуемый азот – по Шконде и Королевой, нитратный – потенциометрически, аммиачный – фотометрически по методу ЦИНАО, фракционно-групповой состав гумуса – по методу Тюрина в модификации Пономарёвой-Плотниковой.

Для характеристики почвенных микробценозов определяли численность различных эколого-трофических групп микроорганизмов. Усваивающие органические формы азота (аммонифицирующие) микроорганизмы учитывали на мясо-пептонном агаре (МПА), усваивающие минеральные источники азота – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), целлюлозолитики – на агаре Гетчинсона с фильтровальной бумагой, олиготрофные – на почвенном агаре (ПА), актиномицеты – на казеин-глицериновом агаре (КА), микроскопические грибы – на агаре Чапека (ЧА) [10]. Для характеристики изменений в структуре почвенного микробного сообщества рассчитывали коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и педотрофности (ПА/МПА) [11].

В качестве модельной группы микроорганизмов для выявления структурных перестроек микробного сообщества использовали актиномицеты. Определение видовой структуры комплексов актиномицетов проводили при выделении на КА, с учётом частоты встречаемости и обилия видов. Дифференцировали и учитывали количественно все цветочные группы актиномицетов (секции и серии) [12]. Морфологию клеток изучали на живых препаратах при микроскопировании – объективы 20 и 40, окуляр 10, микроскоп Leica DM 2500 (Германия).

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием встроенного пакета программ EXCEL.

Результаты и обсуждение

Пахотные дерново-подзолистые почвы по своей природе характеризуются много-

численными свойствами, унаследованными от исходных целинных и, частично, приобретёнными под влиянием хозяйственной деятельности человека. Почвы смешанного хвойно-широколиственного леса и злаково-разнотравного луга в слое 0–20 см характеризовались повышенной кислотностью ($\text{pH}_{\text{КСЛ}}$ 3,8 и 4,8 соответственно) и низким содержанием гумуса (2,70 и 2,15% соответственно), что характерно для дерново-подзолистых почв. Распашка и длительное применение полного минерального удобрения (НРК) привели не только к изменению начальных агрохимических параметров дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, но и сопровождалась увеличением численности всех учитываемых эколого-трофических групп микроорганизмов по сравнению с целинными аналогами, как под смешанным лесом, так и под злаково-разнотравным лугом (табл. 1). Обогащённость пахотной почвы аммонифицирующими и олиготрофными микроорганизмами, в соответствии с оценочной шкалой [11], даже без внесения удобрений, достигла градации «средняя», а в отношении микроорганизмов, усваивающих минеральные формы азота, продолжала соответствовать градации «бедная». При длительном внесении полного минерального удобрения в возрастающих дозах увеличение численности аммонифицирующих и целлюлозолитических микроорганизмов, актиномицетов, микроскопических грибов прослеживалось в диапазоне доз от (НРК) 30 до (НРК) 120 кг д.в./га. Повышение дозы туков от (НРК) 120 до (НРК) 150, напротив, сопровождалось снижением численности основных эколого-трофических групп. При этом степень обогащённости почвы микроорганизмами соответствовала градации «бедная», характерной для целинных дерново-подзолистых почв.

Содержание гумуса в пахотной почве без удобрений (1,80%) за сорокалетний период использования в севооборотах уменьшилось на 18,9% от исходного (2,22%). Потери органического вещества обусловлены интенсивной минерализацией трансформируемых активных компонентов гумуса при малом количестве свежего органического вещества, поступающего в почву при возделывании сельскохозяйственных культур без подкормки. насыщение почвы минеральными удобрениями в дозах от (НРК) 60 до (НРК) 150 кг д.в./га способствовало сохранению исходного содержания гумуса в почве на уровне 2,06–2,16%. По мнению ряда исследователей [13, 14], процессы минерализации гумусовых веществ

обусловлены биохимической деятельностью специфической автохтонной микрофлоры, вырастающей на ПА. Автохтонные микроорганизмы обладают способностью расщеплять углеводы наиболее стойких циклических и гетероциклических связей. Между численностью микроорганизмов, учтённых на ПА, и содержанием гумуса выявлена наиболее тесная в опыте отрицательная корреляция ($r = -0,89$; $p < 0,001$). Другие исследователи возражают против специализации микроорганизмов в разложении гумуса и связывают эти процессы с деятельностью широкого круга микроорганизмов [15]. В пользу этих представлений говорят отрицательные значения коэффициентов корреляции между содержанием в почве гумуса и численностью аммонифицирующих ($r = -0,69$; $p < 0,04$) и усваивающих минеральные формы азота ($r = -0,83$; $p < 0,005$) микроорганизмов (рис. 1). Ранее отмечалось, что при дефиците минерального азота численность аммонифицирующей микрофлоры и скорость микробного разложения органического вещества в почве увеличиваются [16, 17]. Для извлечения азота из труднодоступных соединений микроорганизмы активно используют богатые энергией субстраты, например, лабильные фракции углерода. Между содержанием в почве водорастворимого органического вещества ($\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$) и численностью аммонифицирующих ($r = -0,75$; $p < 0,02$), а также иммобилизующих минеральный азот ($r = -0,85$; $p < 0,003$) бактерий в исследуемой дерново-подзолистой почве установлена тесная обратная связь. В достоверной обратной зависимости от содержания в почве извлекаемых щелочью ($\text{C}_{0,1\text{N NaOH}}$) и пирофосфатом натрия ($\text{C}_{0,1\text{M Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}$) фракций лабильного органического вещества находится также численность бактерий, вырастающих на КАА и ПА.

Коэффициент минерализации (КАА/МПА), отражающий интенсивность мобилизации азота, в пахотной почве без удобрений (0,91) увеличился по сравнению с почвой под лесом (0,75), а по сравнению с почвой под злаково-разнотравным лугом (1,29), напротив, стал существенно ниже (табл. 2). Аналогичные изменения при распашке почвы произошли и с индексом педотрофности (ПА/МПА), характеризующим развитие в почве автохтонной микрофлоры или «микрофлоры рассеяния», способной довольствоваться незначительным количеством питательных веществ. Численность вырастающих на ПА микроорганизмов отрицательно коррелировала с содержанием в почве общего азота

Таблица 1 / Table 1

Количество микроорганизмов в целинных и пахотных дерново-подзолистых почвах при внесении полного минерального удобрения
The number of microorganisms in virgin and arable sod-podzolic soils with the introduction of full mineral fertilizer

Вариант Variant	Общая численность на средах The total number on the medium				Целлюлолитики Cellulolytics		Актиномицеты Actinomycetes	Микромицеты Micromycetes
	МПА / МРА	КАА / КАА	ПА / РА	тыс. КОЕ/г воздушно-сухой почвы / thousand CFU/g of air dry soil				
	1392±329	4075±316	1383±662	71±31	467±344			
Лес/ Forest	1492±284	1958±946	3017±1436	187±74	167±163	78±37	25±12	
Пашня: / Arable:	(NPK) 0	3700±880	5567±686	140±37	717±264	12±10	40±17	
	(NPK) 30	3767±688	4800±447	178±106	983±365	78±72	45±30	
	(NPK) 60	3750±2224	4417±2599	202±67	1717±129	117±54	90±37	
	(NPK) 90	3175±765	2750±1007	103±26	2900±1711	43±8		
	(NPK) 120	5300±912	4183±997	221±110	2500±626			
	(NPK) 150	2958±1175	2033±1426	127±46	1767±1612			
Козлятник восточный/ <i>Galega orientalis</i> L.	1383±944	1592±1019	1217±585	98±38	167±121			

Таблица 3 / Table 3

Структура комплексов актиномицетов в целинных и пахотной дерново-подзолистых почвах при внесении полного минерального удобрения
The structure of actinomycete complexes in virgin and arable sod-podzolic soils with the introduction of full mineral fertilizer

Вариант Variant	Частота встречаемости / долевое участие видов Frequency / abundance of species							Индекс Шеннона, Shannon Index, H	
	секций и серий рода <i>Streptomyces</i> sections and series of the genus <i>Streptomyces</i>								
	Cinereus			Albus	Helvulus	Imperfectus			
	Achromo genes	Chromo genes	Aureas	Violaceus	рода of the genus <i>Micromonospora</i>				
Лес/ Forest	83/35,7	66/10,7	17/3,6	0	17/7,2	33/10,7	17/7,1	83/25,0	2,435
Луг/ Meadow	17/10,0	0	0	0	17/20,0	0	50/60,0	17/10,0	1,570
Пашня: / Arable:	(NPK) 0	50/11,6	66/11,7	0	17/2,4	0	66/27,9	33/13,9	2,238
	(NPK) 30	100/42,3	50/10,2	33/5,1	66/6,8	50/6,8	33/5,1	83/18,6	2,498
	(NPK) 60	100/23,3	83/11,6	33/3,9	83/13,6	50/4,8	50/3,9	50/3,9	2,580
	(NPK) 90	100/27,0	83/6,3	33/2,9	66/4,0	33/1,1	100/33,9	83/14,9	2,443
	(NPK) 120	100/23,4	83/5,5	83/15,3	83/8,8	66/4,8	83/19,9	66/10,8	2,823
	(NPK) 150	83/19,8	66/8,5	33/1,9	66/8,5	17/0,9	66/49,1	33/6,6	2,208
Козлятник восточный/ <i>Galega orientalis</i> L.	17/10,0	0	17/10,0	0	33/20,0	0	33/20,0	33/40,0	2,121

Таблица 2 / Table 2

Показатели, характеризующие направленность микробиологической трансформации органического вещества почвы
Indicators characterizing the direction of microbiological transformation of soil organic matter

Вариант Variant	Коэффициент минерализации (КАА/МПА) Coefficient of mineralization (КАА/МПА)	Индекс педотрофности (ПА/МПА) Pedotrophic Index (РА/МПА)	Доля актиномицетов в прокариотном комплексе, % The proportion of actinomycetes in the prokaryotic complex, %
Лес/ Forest	0,75	0,99	16,8
Луг/ Meadow	1,29	2,02	8,5
Пашня: /Arable:			
(NPK) 0	0,91	1,38	14,5
(NPK) 30	0,81	1,27	20,2
(NPK) 60	0,92	1,18	24,0
(NPK) 90	1,05	0,87	28,5
(NPK) 120	0,65	0,79	25,8
(NPK) 150	0,82	0,69	24,0
Козлятник восточный/ <i>Galegae orientalis</i> L.	1,11	0,88	16,9

($r = -0,82$; $p < 0,006$) и гумуса ($r = -0,89$; $p < 0,001$) (рис. 1, см. цв. вкладку). В севооборотной почве без удобрений наблюдали снижение значения индекса педотрофности (1,38) по сравнению с почвой под лугом (2,02), но повышение по сравнению с почвой под лесом (0,99) (табл. 2).

Среди хозяйственно освоенных почв наиболее высоким коэффициентом минерализации (1,11), при умеренном значении индекса педотрофности (0,88), отличался вариант с бессменным посевом козлятника восточного. Очевидно, биологическая азотфиксация под многолетней бобовой культурой обусловила достаточно высокую обеспеченность почвы аммиачным азотом. За счёт пожнивно-корневых остатков с высоким содержанием азота и зольных элементов в их составе содержание гумуса в этом варианте повысилось от 2,23% при закладке опыта до 2,49%. При этом кислотность почвы за период возделывания козлятника осталась на исходном уровне (pH_{KCl} 4,9), тогда как в севооборотной почве без удобрений выявлена тенденция к подкислению (на 0,5 единиц pH_{KCl}), а в варианте с внесением (NPK) 150 реакция среды в пахотном слое изменилась с pH_{KCl} 5,6 при закладке опыта до pH 4,5 при окончании пятой ротации восьмипольного севооборота. Длительное возделывание козлятника восточного без использования минеральных удобрений, таким образом, приближает почву к устойчивому состоянию природных экосистем.

Роль основных деструкторов растительного опада принадлежит в почве микроскопическим грибам. В литературе отмечается, что микромицеты более чувствительны к изменениям в землепользовании, чем бактерии, в результате чего их доля в микробном сообществе окультуренных почв значительно ниже, чем в их целинных аналогах [18]. Численность грибных пропагул в исследуемых целинных и севооборотных почвах изменялась в пределах десятков тысяч КОЕ/г и лишь в варианте с внесением (NPK) 120 была выше на порядок (табл. 1). Установлена достаточно тесная ($r = 0,68$; $p < 0,04$) положительная связь между численностью микроскопических грибов и содержанием в почве гуминовых кислот (рис. 1). Очевидно, это связано с тем, что синтезируемые микромицетами циклические молекулы меланинов служат основой для построения периферических компонентов гумусовых соединений [16]. Кроме того, численность грибных пропагул в дерново-подзолистой почве положительно коррелировала с такими агрохимическими показателями как содержание минерального азота ($r = 0,68$; $p < 0,04$), а также содержание трудногидролизуемой ($r = 0,87$; $p < 0,002$) и легкогидролизуемой ($r = 0,79$; $p < 0,011$) фракций азота.

Грибные группировки представлены в почве различными родами дейтеромицетов и быстрорастущими видами порядка Mucorales, основу питания которых составляет легкогидролизуемая органика. В популяциях

микромикетов целинных почв доминировали, составляя основной фон, виды рода *Acremonium*, тогда как в почве под лугом встречались также пенициллы и представители рода *Stemphilium* (рис. 2, см. цв. вкладку). В почве под козлятником восточным, наряду с *Acremonium*, доминировали различные виды рода *Penicillium*, часто встречались мукооровые грибы. При распашке разнообразие грибов по сравнению с целинными почвами увеличивалось за счёт появления видов из родов *Aspergillum*, *Penicillium*, *Stemphilium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, типичных для дерново-подзолистых почв данной природно-климатической зоны. При длительном внесении полного минерального удобрения в возрастающих дозах на доминирующие позиции выходят грибы рода *Trichoderma*, а представители рода *Mucor* встречаются лишь в качестве минорного компонента грибного комплекса.

Наряду с грибами в минерализации органических остатков активно участвуют микелиальные прокариоты – актиномицеты. По степени их развития в почве можно судить, на какой стадии минерализации находится почвенный детрит [14]. Целинные почвы под смешанным лесом и злаково-разнотравным лугом значительно различались между собой по структуре актиномицетных комплексов, обусловленной количеством и качеством поступающего в почву растительного опада. Если в почве под лесом отмечены представители шести различных цветовых секций и серий рода *Streptomyces* и микромоноспоровые виды, то актиномицетный комплекс почвы под лугом включал стрептомицеты лишь трёх секций и серий, а микромоноспоры в почве луга встречались как типичные редкие виды (табл. 3). При переходе от целинных к почвам пахотным произошло расширение видового спектра стрептомицетов до пяти секций и серий в варианте без удобрений, и до семи – в вариантах с внесением полного минерального удобрения в возрастающих дозах. В почве под козлятником восточным, длительно не получавшей удобрения, актиномицетный комплекс отличался отсутствием видов из секций и серий *Cinereus Chromogenes*, *Cinereus Violaceus* и секции *Helvolus*, что сближает его с комплексом целинной почвы под злаково-разнотравным лугом. Для обеих почв характерно также отсутствие выраженных доминантов. В то же время почва под козлятником отличалась от целинной более высоким видовым разнообразием актиномицетов. Индекс Шеннона (H), отражающий не только количество

выделяемых таксонов, но и обилие каждого, в почве под козлятником ($H = 2,121$) лишь незначительно уступал значениям H в почве удобренных вариантов ($H = 2,208-2,823$), в то время как видовое разнообразие в целинной почве злаково-разнотравного луга составило всего $H = 1,570$. К числу видов-индикаторов обеспеченности дерново-подзолистой почвы минеральными элементами питания, таким образом, можно отнести представителей секций и серий *Cinereus Violaceus* и секции *Helvolus*, встречающихся только в вариантах с внесением минеральных удобрений и отсутствующих, либо редких в почвах целинных аналогов.

Долевое участие актиномицетов в комплексе бактерий целинных почв под лесом (16,8%) и лугом (8,5%), а также пахотной почвы без удобрений (14,5%) и почвы под козлятником восточным (16,9%) ниже, чем в пахотной дерново-подзолистой почве, длительно получающей полное минеральное удобрение (20,2–28,5% в зависимости от дозы) (табл. 2). Прослеживается положительная корреляция между долей стрептомицетов в прокариотном комплексе и содержанием в почве гумуса ($r = 0,77$; $p < 0,01$). Численность стрептомицетов тесно связана с содержанием минерального азота ($r = 0,83$; $p < 0,005$), а их видовое разнообразие (индекс Шеннона) находится в прямой зависимости от содержания в почве азота трудногидролизуемого ($r = 0,68$; $p < 0,04$) (рис. 1). Среди актиномицетов широко распространена способность продуцировать внеклеточные ферменты – экзогидролазы, которые обеспечивают им возможность использовать для получения азота трудногидролизуемые соединения углерода. Таким образом, значительное присутствие в микробных комплексах актиномицетов указывает на относительно поздние стадии деградации органического вещества, большую обеспеченность почвы минеральным азотом и, в целом, высокую степень трансформированности органического вещества почвы.

Заключение

В результате выполненных исследований для тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почвы Предуралья, используемой на протяжении сорока лет в севообороте с внесением полного минерального удобрения, выявлен тренд к увеличению доли бактерий в соотношении грибов и бактерий в составе почвенного микробного сообщества. С использованием актиномицетов в качестве модельной группы

микроорганизмов выявлены изменения в составе самого бактериального сообщества. Сопоставление результатов определения гумусности, фракционного анализа органического вещества и оценки состояния микробного сообщества позволило установить, что в условиях достаточной обеспеченности элементами минерального питания сохранность органического вещества почвы повышается, поскольку процессы микробного разложения стойких соединений углерода подавлены. Об этом свидетельствует наблюдаемая в длительном стационарном опыте сохранность исходного содержания гумуса в почве на уровне 2,06–2,16%. Таким образом, внесение в почву полного минерального удобрения в долгосрочной перспективе способствует замедлению темпов разложения гумуса и увеличению в его составе трудногидролизующих фракций.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости сосредоточиться в дальнейших исследованиях на факторах, контролируемых формированием почвенного микробного сообщества (тип почвы, растительность, удобрения, агротехника и пр.), что позволит расширять наше понимание микробного вклада в пул органического вещества почвы, приблизиться к пониманию процессов формирования и стабилизации запасов органического вещества в почве.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-590166 р-а «Теоретические и прикладные аспекты трансформации органического вещества и азота пахотных дерново-подзолистых почв Предуралья».

Литература

1. Почвы в биосфере и жизни человека / Под ред. Г.В. Добровольского, Г.С. Куста, В.Г. Санаева. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. 584 с.
2. Howarth W. Carbon cycling and formation of organic matter // *Soil microbiology, ecology, and biochemistry* / Ed. E.A. Paul. Amsterdam: Academic Press, 2007. P. 303–340.
3. Звягинцев Д.Г. Структура и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов // Структурно-функциональная роль почвы и почвенной биоты в биосфере. М.: Наука, 2003. С. 102–114.
4. Chu H., Lin X., Fujii T., Morimoto S., Yagi K., Hu J. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term

fertilizer management // *Soil Biol Biochem.* 2007. V. 39. P. 2971–2976.

5. Вернадский В.И. Углерод и живое вещество в земной коре // *Очерки геохимии. Избранные сочинения.* М.: Изд-во АН СССР, 1954. Ч. 1. С. 147–223.
6. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Академический Проект, 2004. 432 с.
7. He J.Z., Zheng Y., Chen C.R., He Y.Q., Zhang L.M. Microbial composition and diversity of an upland red soil under long-term fertilization treatments as revealed by culture-dependent and culture-independent approaches // *J. Soil Sediments.* 2008. V. 8. P. 349–358.
8. Nemergut D. R., Townsend A.R., Sattin S.R., Freeman K.R., Fierer N., Neff J. C., Schmidt S.K. The effects of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: implications for carbon and nitrogen cycling // *Environmental microbiology.* 2008. V. 10 (11). P. 3093–3105.
9. Cruz A.F., Hamel C., Hanson K., Selles F., Zentner R.P. Thirty-seven years of soil nitrogen and phosphorus fertility management shapes the structure and function of the soil microbial community in a Brown Chernozem // *Plant Soil.* 2009. V. 315. P. 173–184.
10. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 603 с.
11. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробного сообщества почвы, участвующего в трансформации органического вещества: научно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородская с.-х. академия, 2012. 64 с.
12. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.
13. Иутинская Г.А. Почвенная микробиология: учеб. пособие. Киев: Аристей, 2006. 284 с.
14. Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. М.: Наука, 1975. 256 с.
15. Carballas M., Reisinger O., Kilbertus G. Microflora y materia organica reconocible en suelos de Praderia. III. Estaciones mesofilas. Conclusiones generales // *Anales de edafologia y agrobiologia.* 1984. V. 42. No. 9–10. P. 1499–1508.
16. Fontaine S., Barot S. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation // *Ecol Lett.* 2005. V. 8. P. 1075–1087.
17. Moorhead D.L., Sinsabaugh R.L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction // *Ecol. Monogr.* 2006. V. 76. P. 151–174.
18. Jolivet C., Angers D.A., Chantigny M.H., Andreux F., Arrouays D. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping // *Soil Biol Biochem.* 2006. V. 38. P. 2834–2842.

References

1. Soils in the biosphere and human life / Eds. G.V. Dobrovolskiy, G.S. Bush, V.G. Sanaev. Moskva: FGBOU VPO MGUL, 2012. 584 p. (in Russian).
2. Howarth W. Carbon cycling and formation of organic matter // Soil microbiology, ecology, and biochemistry / Ed. E.A. Paul. Amsterdam: Academic Press, 2007. P. 303–340.
3. Zvyagintsev D.G. Structure and functioning of a complex of soil microorganisms // Structural and functional role of soil and soil biota in the biosphere. Moskva: Nauka, 2003. P. 102–114 (in Russian).
4. Chu H., Lin X., Fujii T., Morimoto S., Yagi K., Hu J. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management // Soil Biol Biochem. 2007. V. 39. P. 2971–2976.
5. Vernadsky V.I. Carbon and living matter in the earth's crust // Sketches of geochemistry. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1954. Part 1. P. 147–223 (in Russian).
6. Rozanov B.G. Soil morphology. Moskva: Akad. Proyekt. 2004. 432 p. (in Russian).
7. He J.Z., Zheng Y., Chen C.R., He Y.Q., Zhang L.M. Microbial composition and diversity of an upland red soil under long-term fertilization treatments as revealed by culture-dependent and culture-independent approaches // J. Soil Sediments. 2008. V. 8. P. 349–358.
8. Nemergut D.R., Townsend A.R., Sattin S.R., Freeman K.R., Fierer N., Neff J.C., Schmidt S.K. The effects of chronic nitrogen fertilization on alpine tundra soil microbial communities: implications for carbon and nitrogen cycling // Environmental microbiology. 2008. V. 10 (11). P. 3093–3105.
9. Cruz A.F., Hamel C., Hanson K., Selles F., Zentner R.P. Thirty-seven years of soil nitrogen and phosphorus fertility management shapes the structure and function of the soil microbial community in a Brown Chernozem // Plant Soil. 2009. V. 315. P. 173–184.
10. Workshop in Microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 603 p. (in Russian).
11. Titova V.I., Kozlov A.V. Methods for assessing the functioning of soil microbiocenosis involved in the transformation of organic matter: a scientific and methodological guide. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod Agrarian Academy, 2012. 64 p. (in Russian).
12. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Manual of actinomycetes. Genus *Sreptomycetes*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
13. Iutinskaya G.A. Soil Microbiology: tutorial. Kiev: Aristey, 2006. 284 p. (in Russian).
14. Mishustin E.N. Association of soil microorganisms. Moskva: Nauka, 1975. 256 p. (in Russian).
15. Carballas M., Reisinger O., Kilbertus G. Microflora y materia organica reconocible en suelos de Praderia. III. Estaciones mesofilas. Conclusiones generales // Anales de edafologia y agrobiologia. 1984. V. 42. No. 9–10. P. 1499–1508 (in Spanish).
16. Fontaine S., Barot S. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation // Ecol. Lett. 2005. V. 8. P. 1075–1087.
17. Moorhead D.L., Sinsabaugh R.L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction // Ecol. Monogr. 2006. V. 76. P. 151–174.
18. Jolivet C., Angers D.A., Chantigny M.H, Andreux F., Arrouays D. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping // Soil Biol Biochem. 2006. V. 38. P. 2834–2842.

**Н. Е. ЗАВЬЯЛОВА, И. Г. ШИРОКИХ, А. И. КОСОЛАПОВА, А. А. ШИРОКИХ
МИКРОБНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-
ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРЕДУРАЛЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
И ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ, С. 102**

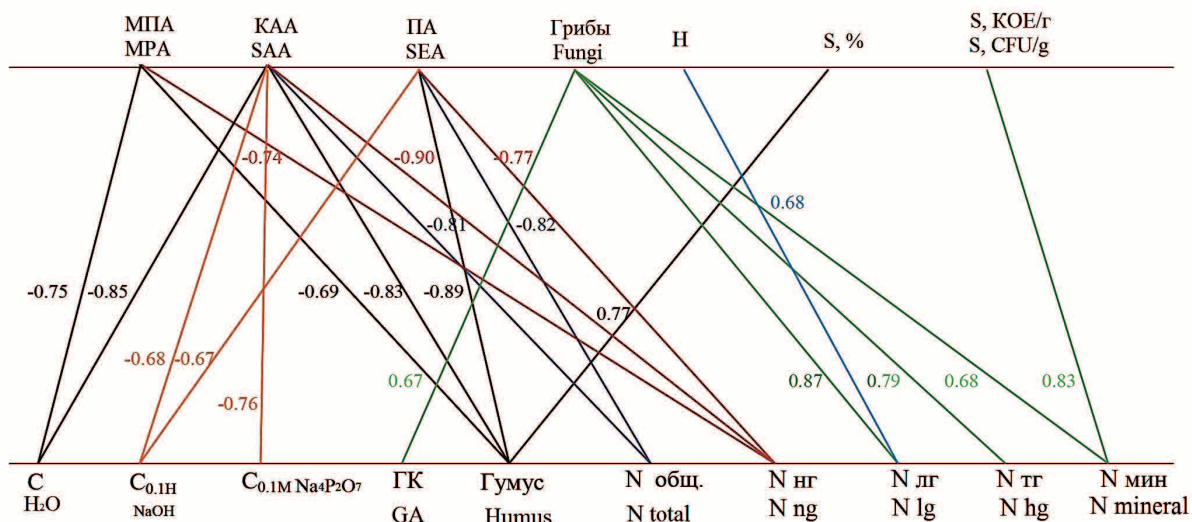


Рис. 1. Коэффициенты корреляции между показателями, характеризующими состояние органического вещества и микробиоценоз дерново-подзолистой почвы:

Н – индекс Шеннона, S – стрептомицеты, ГК – гуминовые кислоты
Fig. 1. Correlation coefficients between indicators characterizing the state of organic matter and the microbiocenosis of sod-podzolic soil:
 Н – the Shannon index, S – Streptomyces, GA – humic acids

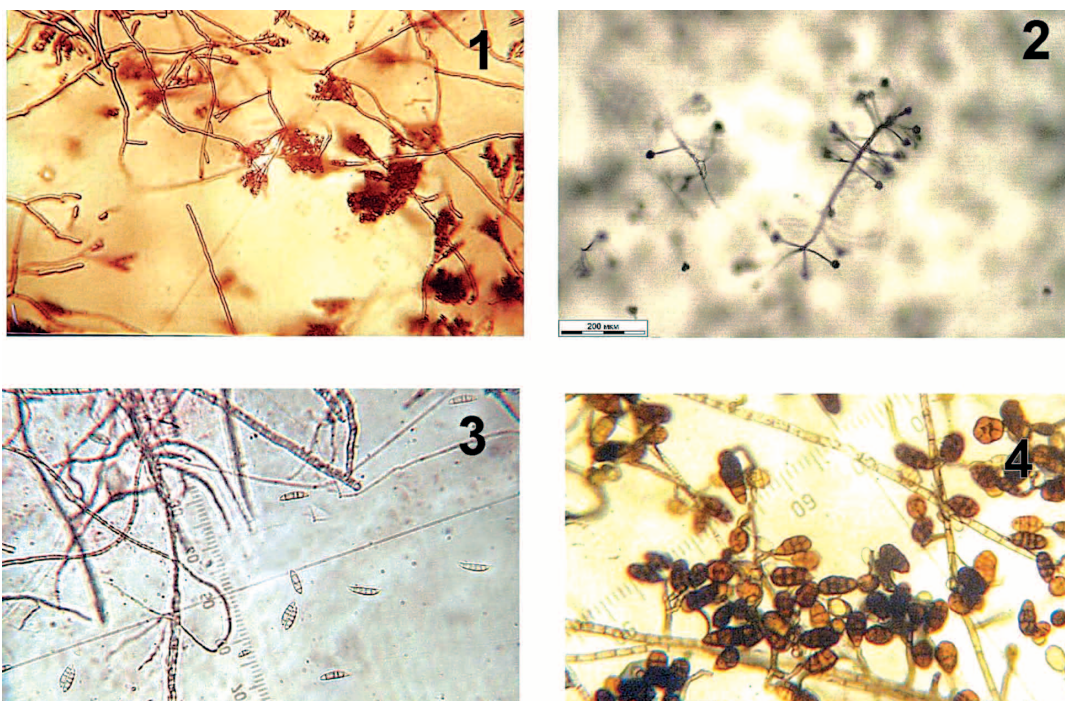


Рис. 2. Микроскопия доминирующих микромицетов в дерново-подзолистой почве: 1 – конидиеносцы *Penicillium* sp., 2 – конидиеносцы *Acremonium* sp., 3 – мицелий и конидии *Fusarium culmorum*, 4 – конидии *Stemphylium* sp. Среда Чапека, 28 °С

Fig. 2. Microscopy of dominant micromycetes in the sod-podzolic soil: 1 – The conidiophores of *Penicillium* sp., 2 – conidiophores of *Acremonium* sp., 3 – mycelium and conidias *Fusarium culmorum*, 4 – conidias *Stemphylium* sp. Чапек media, 28 °C