

Микробиологическое состояние дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении органических и минеральных удобрений

© 2020. Н. Е. Завьялова¹, д. б. н., г. н. с.,
И. Г. Широких^{2,3}, д. б. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
В. Р. Ямалтдинова¹, к. с-х. н., с. н. с.,
¹Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения академии наук,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13 а,
²ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166 а,
³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: nezavyalova@gmail.com

Изучали влияние различных систем удобрения: органической, минеральной и органоминеральной на агрохимические и микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы длительного (50 лет) стационарного опыта. Контролем служила не получавшая удобрений исходная почва, отвечающая грациям «очень бедной» и «бедной», в соответствии с ориентировочной шкалой обогащённости почв микрофлорой. Показано, что органическая и органоминеральные системы удобрения способствовали увеличению в 2–3 раза количества микроорганизмов основных эколого-трофических групп, тогда как длительное применение минеральной системы удобрений, напротив, сопровождалось сокращением численности микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота, по сравнению с вариантом без удобрений. Целлюлозолитическое сообщество в исследуемой почве представлено в основном актиномицетами (55–87%) и немичелиальными бактериями (0–22%). На долю грибов приходится не более 6–27% в зависимости от варианта. Выявлена корреляционная связь между численностью микромицетов и содержанием гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$). Наиболее интенсивно процессы минерализации протекают в контрольной почве без удобрений (КАА/МПА = 1,65) и в почве варианта с органо-минеральной системой удобрения (КАА/МПА = 2,23). При этом показатели $C_{орг.}$, значения коэффициентов педотрофности, индексы видового разнообразия, указывают на то, что интенсивность минерализации почвенного органического вещества в этих вариантах не превышает экологически безопасных пределов, и сформировавшиеся микробные сообщества остаются более устойчивыми к негативным антропогенным воздействиям, чем в вариантах с другими изучаемыми системами удобрений.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, системы удобрения, микроорганизмы, эколого-трофические группы, экологические коэффициенты, структура комплексов актиномицетов.

Microbiological status of the Pre-Urals sod-podzolic soil with long-term use of organic and mineral fertilizers

© 2020. N. E. Zavyalova¹ ORCID: 0000-0003-4005-8998[†]
I. G. Shirokikh^{2,3} ORCID: 0000-0002-3319-2729[†]
V. R. Yamaltdinova¹ ORCID: 0000-0003-2945-0585[†]

¹Perm Federal Research Centre Ural Branch of the Academy of Sciences,
13a, Lenina St., Perm, Russia, 614990,

²Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: nezavyalova@gmail.com

In the long-term (50 years) stationary experiment, the effect of organic, mineral and organo-mineral fertilizer systems on agrochemical and microbiological indicators of sod-podzolic soil was studied. The control was natural soil, which corresponds to the “very poor” and “poor” gradations, according to the scale of soil enrichment with microorganisms. It was shown that organic and organo-mineral fertilizer systems contributed to an increase of 2–3 times the number of microorganisms of the main ecological-trophic groups. Prolonged use of mineral fertilizers, on the contrary, reduced the number of microorganisms participating in the carbon and nitrogen cycle, compared with the version without fertilizers. Cellulolytics are represented in the studied soil by actinomycetes (55–87%) and non-mycelial bacteria (0–22%). The share of fungi accounts for no more than 6–27%, depending on the variant. A correlation was found between the number of micromycetes and the content of humus in the soil ($r = 0.73$), total ($r = 0.82$), and easily hydrolyzed nitrogen ($r = 0.78$). The most intensive processes of mineralization occur in the control soil without fertilizers ($KAA/MPA = 1.65$) and in the soil with an organo-mineral fertilizer system ($KAA/MPA = 2.23$). The indices C_{org} , the values of the pedotrophic coefficients, the indices of species diversity show that the intensity of mineralization of soil organic matter does not exceed environmentally safe limits. The microbial communities formed in these variants remain more resistant to negative anthropogenic influences than in other variants of experience.

Keywords: sod-podzolic soil, fertilizer systems, microorganisms, ecological-trophic groups, ecological coefficients, structure of actinomycete complexes.

Микробиологическое состояние при изучении динамики плодородия почв представляет собой важное звено, поскольку микроорганизмы осуществляют минерализацию органического вещества и участвуют в процессах его гумификации. Актуальность микробиологических исследований в агроэкосистемах обусловлена отрицательной динамикой содержания гумуса во всех земледельческих регионах Российской Федерации независимо от типа почв [1, 2], но особенно злободневно для дерново-подзолистых почв умеренной зоны [3]. Производство растениеводческой продукции в этой зоне должно сопровождаться обязательным применением комплекса мер по воспроизводству плодородия и улучшению гумусного состояния почв. Это требует разработки и применения эффективных систем удобрения для сохранения и улучшения агрохимических и микробиологических параметров почвы.

Как среда обитания микроорганизмов, естественные дерново-подзолистые почвы характеризуются высокой кислотностью почвенного раствора, низким содержанием водорастворимых органических веществ, недостатком необходимых минеральных элементов. Это исключает возможность развития целого ряда требовательных к среде обитания видов и ограничивает нарастание общей численности микроорганизмов при окультуривании почвы [4, 5].

Применение органических и минеральных удобрений является важным фактором воздействия на почвенное микробное сообщество, определяет его биологическую активность и направленность процессов микробной трансформации почвенного органического вещества [6–8]. Большой интерес в этом плане представляют результаты многолетних исследу-

ований в длительных стационарных опытах, когда выявляемые эффекты аккумулируются во времени на фоне изменения факторов окружающей среды в конкретной почвенно-климатической зоне [9, 10].

Цель работы – оценка влияния длительного применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения на микробиологическое состояние и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы Предуралья в длительном стационарном опыте.

Объекты и методы

Исследования проводили в стационарном полевом опыте, заложенном в 1968 г. на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве опытного поля Пермского НИИСХ Пермского Федерального исследовательского центра УрО РАН. В качестве минеральных удобрений (НРК) использовали аммиачную селитру или мочевины, простой суперфосфат и хлористый калий. Схема опыта: контроль (без удобрений); навоз – 10 т/га; навоз – 20 т/га; НРК в дозе, эквивалентной 10 т/га навоза; НРК в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза; 5 т/га навоза + НРК – эквивалент 5 т/га навоза; 10 т/га навоза + НРК – эквивалент 10 т/га навоза; 20 т/га навоза + НРК – эквивалент 20 т/га навоза в год.

Размещение вариантов рендомизированное. Делянки расположены в четыре яруса. Размер посевной делянки 115,5 м², учётной – 80 м². Чередование культур в севообороте: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, картофель, овёс.

Образцы почвы отбирали на глубину корнеобитаемого слоя (0–20 см) по окончании

шести ротаций восьмипольного севооборота, на двух не смежных повторениях после уборки последней культуры севооборота – овса (*Avena sativa* L.) сорта Стайер.

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 [11]: органический углерод – методом мокрого озоления, общий азот – по Къельдалю, легкогидролизуемый азот – по Шконде и Королевой, нитратный – потенциметрически, аммиачный – фотометрически по методу ЦИНАО.

Для характеристики почвенных микробценозов определяли численность экологотрофических групп микроорганизмов методом посева на стандартные питательные среды. 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 (КГА), микроскопические грибы – на агаре Чапека (ЧА) [12]. Для характеристики изменений в струк-

туре почвенного микробного сообщества рассчитывали коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и педотрофности (ПА/МПА) [13]. В качестве модельной группы микроорганизмов для выявления структурных перестроек микробного сообщества использовали актиномицеты. Определение видовой структуры комплексов актиномицетов проводили при выделении на КГА, с учётом частоты встречаемости и обилия видов. Дифференцировали и учитывали количественно все цветочные группы актиномицетов (секции и серии) [14]. 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

Содержание органического углерода ($C_{орг.}$) и общего азота ($N_{общ.}$) в почве являются основными показателями, определяющими уровень её плодородия. В зависимости от применяемой системы удобрения: органической, минеральной или органоминеральной – содержание этих элементов в дерново-подзолистой почве повышалось в различной степени. Наиболее

Таблица 1 / Table 1
Агрохимические показатели почвы в зависимости от системы удобрения
Agrochemical parameters of soil depending on the fertilizer system

Система удобрений Fertilizer system	Вариант Variant	$C_{орг.}$ $C_{org}, \%$	pH_{KCl}	P_2O_5	K_2O	$N_{общ.}$ $N_{tot.}$	$N_{лг.}$ $N_{lg.}$	$N_{мин.}$ N_{min}
	Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	1,14	4,9	125	174	1219,8	160,3	8,3
Органическая Organic	Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	1,30	5,3	180	212	1371,0	195,7	8,5
	Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	1,45	5,6	245	286	1420,0	212,8	10,6
Минеральная Mineral	НПК – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	1,26	4,6	235	203	1252,0	189,2	9,6
	НПК – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	1,29	4,6	261	279	1422,0	217,2	10,1
Органоминеральная Organo-mineral	5 т/га навоза + НПК эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	1,33	4,9	240	250	1279,8	210,0	9,4
	10 т/га навоза + НПК эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	1,43	4,9	270	337	1579,8	225,1	9,6
	20 т/га навоза + НПК эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	1,57	4,9	404	455	1652,5	256,6	12,3
	HCP_{05}/LSD_{05}	0,08	0,3	81	42	170,0	38,3	1,2

значительный рост запасов углерода в почве обеспечили варианты с насыщением пашни навозом – 20 т/га (с 1,14 в контроле до 1,45%), и при сочетании 10–20 т/га навоза с NPK в эквивалентных навозу дозах (до 1,33–1,57%) (табл. 1).

Положительную роль в сохранении и накоплении органического углерода и $N_{\text{общ}}$ в почве сыграло наличие в севообороте двух полей клевера [15]. Длительное применение органического удобрения способствовало снижению кислотности почвы на 0,4–0,7 ед. рН, тогда как использование минеральных удобрений, напротив, привело к повышению почвенной кислотности на 0,3 ед. рН по сравнению с контролем. Все применяемые системы удобрений обеспечили увеличение в пахотном слое почвы по сравнению с вариантом без удобрения содержания подвижных форм фосфора и калия. Наибольшее накопление этих элементов (P_2O_5 до 270 и 404 мг/кг; K_2O до 337 и 455 мг/кг) наблюдали при внесении соответственно 10 и 20 т/га навоза в год совместно с минеральными удобрениями (NPK) в эквивалентных навозу количествах (органоминеральная система удобрений).

Длительное применение различных систем удобрения оказало положительное влияние на азотный режим исследуемой почвы. Органические системы удобрений повысили содержание $N_{\text{общ}}$ на 12,4–16,4%, минеральные – на 2,6–16,6%, органоминеральные – на 29,5–35,5%.

Минеральные формы азота ($N_{\text{мин}}$) представлены в почве незначительно, их доля составляет около 1,0% от общего азота. Содержание $N_{\text{мин}}$ достоверно увеличилось по сравнению с контролем при внесении высоких доз удобрений, то есть в вариантах с насыщением почвы навозом – 20 т/га, минеральным эквивалентом данной дозы навоза и при совместном применении 10 и 20 т/га навоза и NPK в эквивалентных навозу количествах. Ближайшим резервом питания растений является фракция легкогидролизуемого азота ($N_{\text{лг}}$). Отмечено достоверное увеличение в почве содержания $N_{\text{лг}}$ в результате длительного применения изучаемых систем удобрения, что свидетельствует об улучшении азотного режима почвы. Максимальный уровень $N_{\text{лг}}$ (256,6 мг/кг почвы) отмечен в варианте с внесением 20 т/га навоза в год совместно с эквивалентным количеством минеральных удобрений.

Определение численности микроорганизмов методом посева из разведений на твёр-

дые питательные среды показало, что изучаемая почва в соответствии с ориентировочной шкалой обогащённости почвы микрофлорой [13], соответствует грациям «очень бедной» и «бедной». Длительное применение различных систем удобрения в стационарном опыте на дерново-подзолистой почве оказало существенное влияние на количественный и качественный состав почвенных микроорганизмов (рис.). На фоне использования минеральных удобрений наблюдали снижение численности аммонифицирующих, олиготрофных и усваивающих минеральные формы азота бактерий по сравнению с контролем, особенно значительное при увеличении эквивалентной дозы NPK с 10 до 20 т/га. Численность целлюлозолитиков при внесении минеральных удобрений в низкой дозе увеличивалась, а при высокой – уменьшалась по сравнению с контролем. Очевидно, снижение микробной численности в этих вариантах связано с отмеченным выше подкислением почвенного раствора в результате длительного применения минеральных удобрений.

Органическая и органоминеральная системы удобрения, напротив, способствовали увеличению в 2–3 раза количества микроорганизмов основных эколого-трофических групп по сравнению с вариантом без удобрений.

Внесение невысокой дозы навоза (5 т/га) в сочетании с NPK в эквивалентном навозу количестве не способствовало накоплению в почве микроорганизмов, участвующих в круговороте азота и углерода. Их содержание оставалось на уровне контроля. Наиболее благоприятные условия для роста и размножения всех учитываемых групп микроорганизмов были установлены при насыщении пашни навозом из расчёта 10 т/га в год, и при органоминеральной системе удобрения в варианте 20 т/га навоза + эквивалент NPK. Количество бактерий на МПА в этих вариантах достигало максимальных в опыте значений – 3675 ± 536 и 4050 ± 996 тыс. КОЕ/г в. с. почвы.

Наибольшему накоплению микроорганизмов, потребляющих минеральные формы азота (бактерии, грибы, актиномицеты, вырастающие на КАА) способствовали органическая система удобрения с насыщением почвы 10 т/га навоза ежегодно и органоминеральные системы удобрений. На фоне длительного применения минеральных удобрений содержание данной группы микроорганизмов, напротив, значительно ниже, чем в контроле. В долевого отношении в составе иммобилизирующей минеральный азот микрофлоры преобладали бактерии, составляя от 79 до 94%, при этом

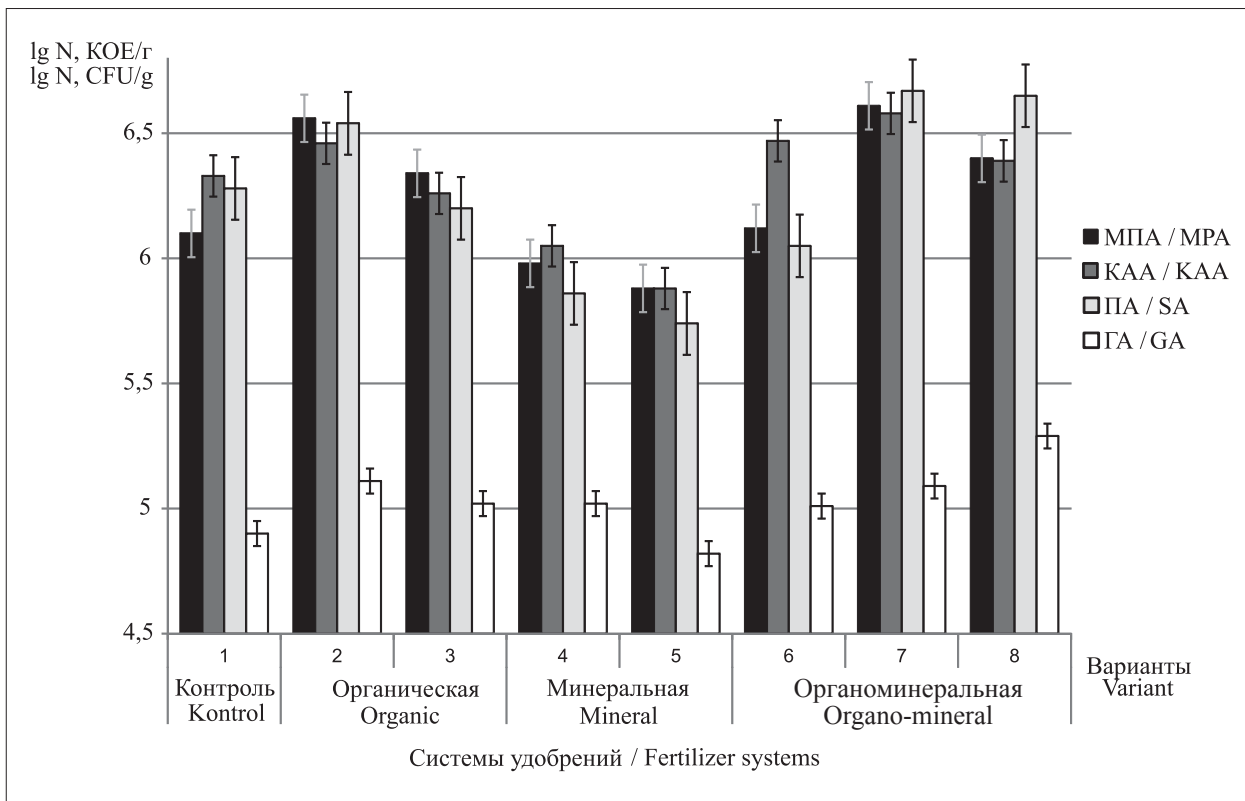


Рис. Количество микроорганизмов (N, КОЕ/г) разных эколого-трофических групп в зависимости от применяемой системы удобрения: 1 – без удобрений; 2 – навоз 10 т/га; 3 – навоз 20 т/га; 4 – NPK в дозе, эквивалентной 10 т/га навоза; 5 – NPK в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза; 6 – 5 т/га навоза + NPK – эквивалент 5 т/га навоза; 7 – 10 т/га навоза + NPK – эквивалент 10 т/га навоза; 8 – 20 т/га навоза + NPK – эквивалент 20 т/га навоза

Fig. Number of microorganisms (N, CFU/g) of different ecological and trophic groups depending on the applied fertilizer system: 1 – without fertilizers; 2 – manure 10 ton/ha; 3 – manure 20 ton/ha; 4 – NPK in a dose equivalent to 10 ton/ha of manure; 5 – NPK in a dose equivalent to 20 ton/ha of manure; 6 – 5 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 5 ton/ha of manure; 7 – 10 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 10 ton/ha of manure; 8 – 20 ton/ha of manure + NPK – equivalent to 20 ton/ha of manure

доля мицелиальных бактерий – актиномицетов изменялась по вариантам от 4,5 до 18%. Доля грибов в составе утилизирующей минеральные формы азота микрофлоры была самой малочисленной и не превышала 0–4,5%.

Численность целлюлолитической микрофлоры, разлагающей безазотистое органическое вещество почвы (полисахариды, целлюлозы) варьировала от 66 ± 12 тыс. до $195 \pm 17,9$ тыс. КОЕ/г в с. почвы в зависимости от варианта (рис.). Наибольшему увеличению количества микроорганизмов-целлюлолитиков способствовала органоминеральная система удобрения с насыщением почвы навозом 20 т/га и эквивалентным количеством NPK. Наименьшая численность целлюлолитиков отмечена при внесении минеральных удобрений в дозе, эквивалентной 20 т/га навоза. В доле отношений наибольшую часть целлюлолитического сообщества составляют актиномицеты – 55–87%, доля грибов колеблется от

6 до 27%, немцелиальных бактерий – 0–22%. Корреляционный анализ выявил тесную положительную связь между общим количеством целлюлолитиков и содержанием гумуса ($r = 0,78$), а также содержанием в почве общего азота ($r = 0,70$).

Помимо определения общей численности эколого-трофических групп микроорганизмов, дополнительную информацию в агроэкологических исследованиях почвенной микробиоты даёт расчёт экологических коэффициентов, которые позволяют проследить за особенностями взаимоотношений отдельных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе трансформации органического вещества почвы [13].

Степень развития амилолитической части почвенного микробоценоза и, соответственно, её активность в трансформации углеводов почвы и связывании свободного азота отражает коэффициент минерализации и иммобилизации

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты, характеризующие направленность микробиологических процессов, и численность мицелиальных групп микроорганизмов в зависимости от системы удобрения
Coefficients characterizing the direction of microbiological processes and the number of mycelial groups of microorganisms depending on the fertilizer system

Вариант Variant	Коэффициенты Coefficients		Численность, тыс. КОЕ/г Number, thousand CFU/g		Доля актиномицетов в прокариотном комплексе, % Share of actinomycetes in prokariotic complex, %
	минерализации mineralizations (КАА/МПА)	педотрофности pedotrophic (ПА/МПА)	микромиицетов micromycetes	актиномицетов actinomycetes	
Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	1,65	1,50	23±19,7	767±501	17,8
Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	0,76	0,95	38±18,3	1050±671	17,2
Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	0,80	0,72	25±16,4	783±337	10,9
НРК – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	1,14	0,75	25±5,5	1317±1163	18,0
НРК – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	1,00	0,73	33±10,3	917±793	19,2
5 т/га навоза + НРК эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	2,23	0,86	25±22,6	1450±1106	17,2
10 т/га навоза + НРК эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	0,93	1,17	40±12,6	600±276	13,8
20 т/га навоза + НРК эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	0,96	1,77	83±40,8	950±547	21,1

Е.Н. Мишустина (соотношение КАА/МПА). Чем он выше (выше 1), тем минерализационные процессы протекают в почве интенсивнее, но слишком высокое значение коэффициента минерализации может косвенно свидетельствовать о повышении скорости разложения гумуса. Судя по величине коэффициента, процессы минерализации протекали наиболее интенсивно в вариантах без удобрений (1,65) и при насыщении почвы навозом 5 т/га + эквивалент НРК (2,23) (табл. 2).

При длительном внесении органических удобрений коэффициенты минерализации характеризовались минимальными в опыте значениями – 0,76–0,80, а применение органо-минеральной системы удобрения с умеренным (10 т/га) и повышенным (20 т/га) ежегодным внесением навоза обеспечило коэффициенты минерализации, близкие к единице (0,93–0,96). Близкими к единице значениями (1,00–1,14) характеризовались коэффициенты минерализации и в почве вариантов с минеральной системой удобрения.

Степень развития микроорганизмов, относящихся к коренному микронаселению почвы (автохтонная часть), а также участвующих в новообразовании гумусовых соединений характеризует отношение числа микроорганизмов, растущих на почвенном агаре (ПА), к числу микроорганизмов, растущих на богатых органических средах (МПА) – коэффициент педотрофности по Никитину [13]. Считается, что чем выше данный коэффициент, тем более агроэкосистема приближена к естественным ценозам изучаемой почвенно-климатической зоны и обладает большей устойчивостью к негативным воздействиям со стороны различных антропогенных вмешательств. Повышение данного индекса в целом может свидетельствовать о замедлении процессов деструкции органического вещества и о переходе изучаемого биоценоза в более устойчивое состояние. По результатам наших исследований вариант без применения удобрений и органо-минеральные системы, где наряду с навозом (10 и 20 т/га) вносили НРК в эквивалентных

навозу количествах, способствовали формированию микробоценозов, более устойчивых к негативным антропогенным воздействиям, чем в других вариантах опыта. Таким образом, расчёт экологических коэффициентов выявил различную направленность микробиологических процессов, протекающих в исследуемой дерново-подзолистой почве в зависимости от доз и вида длительно вносимых удобрений и формирования различных пищевых режимов.

Основными деструкторами растительных остатков в почве являются микромицеты (микроскопические грибы). Численность микромицетов при определении методом посева, как правило, очень низкая по сравнению с другими группами микроорганизмов. Это объясняется тем, что грибы обычно представлены в почвах стерильным мицелием, споры встречаются единично [5], поэтому результаты посева не отражают реальной картины, но пригодны для сравнительных оценок. Количество грибных пропагул в почве длительного стационара изменялось от $23,0 \pm 19,7$ тыс. в варианте без удобрений до $83,0 \pm 40,8$ тыс. КОЕ/г в варианте с насыщением почвы навозом в количестве 20 т/га и эквивалентным количеством NPK (табл. 2). Численность микромицетов

тесно коррелировала с содержанием гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$).

Наряду с грибами, в разложении растительных остатков активно участвуют мицелиальные бактерии – актиномицеты, вступая в сложный конвейерный процесс на поздних стадиях, утилизируя недоступные другим бактериям трудноразлагаемые компоненты. Доля актиномицетов в прокариотном комплексе дерново-подзолистой почвы изменялась в пределах 10,9–21,2% в зависимости от варианта (табл. 2). Актиномицеты, как и многие микроскопические грибы, образуют тёмноокрашенные пигменты – меланины, являющиеся предшественниками гумусовых веществ в почве, принимают участие в формировании почвенного плодородия [16]. Наибольшее накопление в почве актиномицетов наблюдали в вариантах с умеренными дозами минеральных и органических удобрений (навоз – 10 т/га в год, NPK – эквивалент 10 т/га навоза, навоз – 5 т/га в год + NPK – эквивалент 5 т/га навоза). При дальнейшем повышении доз удобрений количество актиномицетов в почве не только не увеличивалось, но, напротив, сопровождалось тенденцией к снижению. Наряду с количественны-

Таблица 3 / Table 3
Видовая структура комплексов актиномицетов в зависимости от системы удобрения
Species structure of actinomycetes complexes depending on the fertilizer system

Вариант Variant	Частота встречаемости/ доленое участие видов Frequency / abundance of species							
	секций и серий рода <i>Streptomyces</i> sections and series of the genus <i>Streptomyces</i>							рода genera <i>Micromonospora</i>
	Cinereus				Albus	Helvolutus	Imperfectus	
	Achromogenera	Chromogenera	Aureus	Violaceus				
Без удобрений (контроль) Without fertilizers (control)	66/15,2	66/13,0	50/6,4	0	50/6,5	50/6,3	66/39,6	66/13,0
Навоз – 10 т/га Manure – 10 ton/ha	50/6,3	50/9,5	50/6,3	0	50/11,0	0	66/27,0	100/39,9
Навоз – 20 т/га Manure – 20 ton/ha	50/10,6	33/4,2	83/19,1	0	33/4,3	0	100/48,9	66/12,8
NPK – эквивалент 10 т/га навоза equivalent to 10 ton/ha of manure	66/34,2	50/8,9	83/8,9	17/1,3	50/3,8	17/1,2	83/26,6	66/15,2
NPK – эквивалент 20 т/га навоза equivalent to 20 ton/ha of manure	50/21,8	66/16,5	50/9,0	33/5,5	33/5,5	33/9,0	83/32,7	0
5 т/га навоза + NPK эквивалент 5 ton/ha manure + NPK equivalent	83/34,4	33/6,9	50/5,7	33/2,4	50/10,3	66/4,7	100/29,9	50/5,7
10 т/га навоза + NPK эквивалент 10 ton/ha manure + NPK equivalent	100/30,6	17/2,8	50/8,3	33/5,6	17/2,7	33/5,5	33/16,7	50/27,8
20 т/га навоза + NPK эквивалент 20 ton/ha manure + NPK equivalent	83/33,3	17/5,3	66/8,8	17/3,5	66/7,0	0	66/31,6	50/10,5

ми, выявлены качественные различия в видовой структуре актиномицетов, заключающиеся в различной частоте встречаемости и относительном обилии представителей отдельных цветковых секций и серий рода *Streptomyces* в зависимости от варианта (табл. 3).

Актиномицетный комплекс в почве варианта без удобрений включал виды шести цветковых секций и серий рода *Streptomyces*, а также виды рода *Micromonospora*. Доминировали по частоте встречаемости (> 50%) и доле участия (> 13%) в комплексе представители серий *Cinereus Achromogenes*, *Cinereus Chromogenes*, *Imperfectus* и микромонопоровые актиномицеты. В результате насыщения пашни 10 и 20 т/га навозом ежегодно количество видовых секций и серий уменьшилось до пяти за счёт выпадения видов секции *Helvolus*. В вариантах с внесением в почву НРК в дозах, эквивалентных 10 и 20 т/га навоза, видовой спектр, напротив, увеличивался за счёт представителей серии *Cinereus Violaceus*, а виды серии *Cinereus Aureus* перешли в разряд доминантов. Вместе с тем, повышенная доза минеральных удобрений способствовала вытеснению из комплекса представителей рода *Micromonospora*. При насыщении пашни навозом в дозах 5 и 10 т/га + эквивалент НРК в актиномицетном комплексе наблюдали наибольшее разнообразие видов. Увеличение дозы навоза до 20 т/га + эквивалент НРК оказало на комплекс актиномицетов обратное действие: видовой спектр сократился за счёт выпадения видов секции *Helvolus*, а представители серии *Cinereus Chromogenes*, как и в варианте «навоз 10 т/га + эквивалент НРК» выбыли из числа доминирующих.

Заключение

Под влиянием различных систем удобрения: органической, минеральной и органоминеральной в пахотном слое дерново-подзолистой почвы длительного (50 лет) стационарного опыта в различной степени увеличились запасы общего углерода и азота, повысилось содержание подвижных форм фосфора и калия, изменилась степень почвенной кислотности. В условиях различных пищевых режимов в почве сформировались сообщества, различающиеся по численности и соотношению представителей основных эколого-трофических групп микроорганизмов, видовому составу актиномицетов. Органическая и органоминеральная системы удобрения способствовали увеличению

в 2–3 раза численности микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода и азота, тогда как длительное применение минеральной системы удобрения, напротив, сопровождалось сокращением их численности, по сравнению с вариантом без удобрений. В зависимости от уровня обеспеченности почвы углеродом и азотом в пахотном слое протекали разнонаправленные процессы трансформации их соединений, о чём свидетельствуют различные по величине значения экологических коэффициентов. Установлена тесная положительная связь между количеством микроорганизмов-деструкторов целлюлозы и содержанием в почве гумуса ($r = 0,78$), а также общего азота ($r = 0,70$). Выявлена тесная корреляция между численностью микроскопических грибов и содержанием в почве гумуса ($r = 0,73$), общего ($r = 0,82$) и легкогидролизуемого азота ($r = 0,78$), что подтверждает ведущую роль почвенной микробиоты в трансформации органического вещества почвы при использовании различных систем удобрения.

Наиболее благоприятные эдафические условия в дерново-подзолистой почве Предуралья, судя по данным микробиологического и агрохимического обследования, сложились при длительном применении органической и органоминеральной систем удобрений.

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. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
2. Тихонович И.А., Круглов Ю.В. Микробиологические аспекты плодородия почвы и проблемы устойчивого земледелия // Плодородие. 2006. № 5. С. 9–12.
3. Гомонова Н.Ф., Минеев В.Г. Динамика гумусного состояния и азотного режима дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2012. № 6. С. 23–31.
4. Мишустин Е.Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. М.: Наука, 1972. 343 с.
5. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
6. Минеев В.Г., Козлова Ю.Е., Кураков А.В., Гомонова Н.Ф., Звягинцев Д.Г. Влияние последствия минеральных удобрений на микробиологические и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Доклады РАСХН. 2001. № 4. С. 19–21.

7. Мосина Л.В., Мерзлая Г.Е. Экологическая оценка влияния органических и минеральных удобрений на микрофлору дерново-подзолистой почвы и продуктивность агроценозов в экстремальных погодных условиях // Известия ТСХА. 2013. № 5. С. 5–18.

8. Kurakov A.V., Kozlova Yu.E. Tolerance of the microbial complex of soddy-podzolic soils to the impact of mineral fertilizers // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. No. 5. P. 528–532.

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. Sun D., Bi Q., Li K., Dai P., Yu Y., Zhou W., Jin C. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources // Biology and fertility of soils. 2018. V. 54. No. 2. P. 229–241.

11. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

12. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 603 с.

13. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: научно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородская сельскохозяйственная академия, 2012. 64 с.

14. 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.

15. Завьялова Н.Е., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Влияние севооборотов и бессменных посевов на агрохимические свойства и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2019. № 1. С. 5–10.

16. Звягинцев Д.Г. Строение и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов // Структурно-функциональная роль почвы и почвенной биоты в биосфере. М.: Наука, 2003. С. 102–114.

References

1. Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moskva: GEOS, 2015. 233 p. (in Russian).

2. Tikhonovich I.A., Kruglov Yu.V. Microbiological aspects of soil fertility and problems of sustainable agriculture // Plodorodiye. 2006. No. 5. P. 9–12 (in Russian).

3. Gomonova N.F., Mineyev V.G. Dynamics of the humus state and the nitrogen regime of the sod-podzolic medium loamy soil with prolonged use of fertilizers // Agrokimiya. 2012. No. 6. P. 23–31 (in Russian).

4. Mishustin Ye.N. Microorganisms and productivity of farming. Moskva: Nauka, 1972. 343 p. (in Russian).

5. Aristovskaya T.V. Microbiology of soil formation processes. Leningrad: Nauka, 1980. 187 p. (in Russian).

6. Mineev V.G., Kozlova Yu.E., Kurakov A.V., Gomonova N.F., Zvyagintsev D.G. Result of the effect of mineral fertilizers on the microbiological and agrochemical properties of sod-podzolic soil // Doklady RASKHN. 2001. No. 4. P. 19–21 (in Russian).

7. Mosina L.V., Merzlaya G.E. Ecological assessment of the effect of organic and mineral fertilizers on the microflora of sod-podzolic soil and the productivity of agroценоses in extreme weather conditions // Izvestiya TSKHA. 2013. V. 5. P. 5–18 (in Russian).

8. Kurakov A.V., Kozlova Yu.E. Tolerance of the microbial complex of soddy-podzolic soils to the impact of mineral fertilizers // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. No. 5. P. 528–532.

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. doi: 10.1007/s11104-008-9742-x

10. Sun D., Bi Q., Li K., Dai P., Yu Y., Zhou W., Jin C. Significance of temperature and water availability for soil phosphorus transformation and microbial community composition as affected by fertilizer sources // Biology and fertility of soils. 2018. V. 54. No. 2. P. 229–241. doi: 10.1007/s00374-017-1252-7

11. Workshop on agrochemistry / Ed. V.G. Mineev. Moskva: Izd-vo MGU, 2001. 689 p. (in Russian).

12. Workshop in microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 603 p. (in Russian).

13. 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 State Agricultural Academy, 2012. 64 p. (in Russian).

14. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Manual of actinomycetes. Genus *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).

15. Zav'yalova N.E., Fomin D.S., Teterlev I.S. The influence of crop rotations and permanent crops on the agrochemical properties and the nitrogen regime of the sod-podzolic soil of the Pre-Urals // Agrokimiya. 2019. No. 1. P. 5–10 (in Russian).

16. 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).