

УДК 631.42:631.46

ОСОБЕННОСТИ МИКРОБОЦЕНОЗА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ *

Нина Петровна Ковалевская ¹, Нина Егоровна Завьялова ²,
Дмитрий Юрьевич Шаравин ³, Марина Тагирьяновна Васбиева ⁴

*Институт экологии и генетики микроорганизмов ПФИЦ УрО РАН
614081, Пермь, Россия ул. Голева, д. 13*

*Пермский НИИ сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН
614532, Пермский край, Россия, Лобаново, ул. Культуры, д. 12*

¹ – к. б. н., м. н. с., ИЭГМ ПФИЦ УрО РАН; e-mail: nina_kov@mail.ru

² – д. б. н., гл. н. с., Пермский НИИСХ ПФИЦ УрО РАН

³ – к. б. н., инж., ИЭГМ ПФИЦ УрО РАН; e-mail: dima-sharavin@yandex.ru

⁴ – к. б. н., с. н. с., Пермский НИИСХ ПФИЦ УрО РАН

В длительном стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве на территории Пермского края изучали влияние применения органических и минеральных удобрений на состояние почвенного микробоценоза. Показатели коэффициента микробного дыхания QR отражали нарушение устойчивости микробного сообщества дерново-подзолистой почвы при длительном использовании удобрений. Доля $C_{\text{микро}}$ в почвенном органическом углероде изученных почв (верхний слой) составила 1,29–2,23%, наибольшие значения этого показателя были получены в варианте опыта без внесения удобрений. Сочетание минеральных и органических удобрений в вариантах Фон + навоз КРС 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га повышало метаболический коэффициент qCO_2 в сравнении с контролем в 1,5 и 2 раза. Максимальные показатели биологической азотфиксации были получены в вариантах ОСВ 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га и соответствовали 33,1 и 28,1 мкг C_2H_4 /кг ч.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, органоминеральные удобрения, микробоценоз почвы, углерод микробной биомассы, коэффициент микробного дыхания, азотфиксация.

Сохранение и повышение плодородия дерново-подзолистых почв непосредственно связано с применением органических и минеральных удобрений, действие которых оказывает большое влияние на почвенную биоту [1]. Состав и свойства микробоценоза дерново-подзолистых почв определяются особенностями физико-химических свойств почвы характером поступающей в нее растительности, промывным водным режимом и другими биоклиматическими факторами [2, 3]. Низкое содержание азота, недостаток необходимых минеральных элементов и легкодоступных органических веществ в почвах и растениях исключает развитие целого ряда требовательных к среде обитания видов и ограничивает нарастание общей численности микроорганизмов. При окультуривании целинные дерново-подзолистые почвы утрачивают специфические черты естественных микробоценозов. Обогащение почв минеральными

элементами, азотом и доступными органическими соединениями, а также смена природных ценозов культурными растениями резко изменяют условия обитания микроорганизмов в почве, что влияет на структурно-функциональную организацию сообщества микроорганизмов. Интегральным показателем деятельности почвенных микроорганизмов является продуцирование ими углекислого газа. Этот показатель отражает общую закономерность влияния агротехнологий на биологическую активность почвы [4]. Не менее важным показателем функционирования микробных сообществ почвы является уровень биологической азотфиксации. Азот – биогенный элемент, изменения и превращения которого в почве напрямую связаны с процессом гумусообразования. В агроэкосистемах нарушен биогеохимический цикл азота из-за регулярных обработок почвы, внесения удобрений, применения севооборотов разных типов и выноса значительного количества этого элемента с урожаем [5]. Биологический азот в противовес азоту удобрений более предпочтителен с точки зрения охраны окружающей среды, так как его влияние

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-45-590166 p_a).

1. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы

Варианты опыта	pH _{KCl}	N _{общ.} , мг/кг	Гумус, %	ГК*	ФК*	$\frac{C_{ГК}}{C_{ФК}}$	Запасы гумуса, т/га
Контроль	4,4	1176	1,92	0,31	0,35	0,89	48,0
Навоз КРС 40 т/га	4,6	1162	2,03	0,32	0,35	0,91	50,8
ОСВ 40 т/га	4,5	1372	2,20	0,33	0,36	0,92	54,9
N60 P60 K60 – фон	4,1	1281	2,07	0,36	0,41	0,88	51,6
Фон + навоз КРС 40 т/га	4,4	1379	2,26	0,37	0,40	0,93	56,5
Фон + ОСВ 40 т/га	4,2	1442	2,42	0,38	0,42	0,91	60,4

* ГК, ФК – % к массе почвы

на растения пролонгировано на несколько лет с равномерным поступлением в растения в течение всего периода вегетации [6].

Цель исследования – оценить влияние минеральных и органических удобрений на биологическую активность микробного сообщества дерново-подзолистой почвы в условиях Предуралья.

Методика. Полевые исследования проводили на базе длительного стационара, заложенного в 1976 г. Почва опытного участка дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика почвы при закладке опыта: гумус 2,2 %, pH_{KCl} 4,8, Н_г 3,7 и S 18,1 ммоль экв/100 г, подвижные P₂O₅ и K₂O (по Кирсанову) 154 и 170 мг/кг. Почвообразующая порода – желто-бурая некарбонатная покровная глина. В качестве органических удобрений использовали осадки сточных вод (ОСВ) биологических очистных сооружений г. Перми и навоз крупного рогатого скота (КРС). Органические удобрения вносили в дозе по 40 т/га в чистом пару 1 раз в ротацию севооборотов. ОСВ вносили в I–VI ротациях, навоз КРС в III–VI ротациях севооборота. Минеральные удобрения вносили под все зерновые культуры севооборота под предпосевную культивацию в форме аммиачной селитры или мочевины, простого суперфосфата и хлористого калия. Дозы удобрений в I ротации N120P120K120, во II ротации N90P90K90, в III–VI ротациях N60P60K60. Схема эксперимента представлена в табл. 1–3.

Опыт проводили в семипольном зерно-паротравяно-пропашном севообороте с чередованием культур: чистый пар – озимая рожь (*Secale cereale* L.) – яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) с подсевом клевера (*Trifolium pratense* L.) – клевер 1 г.п. – клевер 2 г.п. – ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – овёс (*Avena sativa* L.). Повторность вариантов в опыте трёхкратная, положение делянок систематическое. Общая площадь делянки 47,5 м², учётная – 24,0 м². ОСВ, применяемые в опыте в V–VI ротациях севооборота, по агрохимическим показателям и содержанию ТМ соответствуют требованиям ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001

[7]. ОСВ применяли после выдержки на иловых площадках не менее трёх лет в результате чего, согласно СанПиН 2.1.7.573-96 [8], происходит их обеззараживание и они соответствуют требуемым микробиологическим и паразитологическим показателям.

Отбор проб почвы в опыте проводили буром на глубину 0–20 см после уборки последней культуры севооборота – овса.

В почвенных пробах, отобранных в конце сентября 2017 г. на глубину 0–20 см определяли гумус по методу Тюрина в модификации ЦИНАО, общий азот – по Кьельдалю, фракционно-групповой состав гумуса – по методу Тюрина в модификации Пономарёвой-Плотниковой [9] Экстракцию углерода лабильных гумусовых веществ проводили нейтральным раствором пирофосфата натрия [10].

Величину базального дыхания (БД) и субстратиндуцированного дыхания (СИД) устанавливали согласно методике Ананьевой [11]. Повторность измерений трёхкратная. Скорость БД и СИД измеряли в мкг С–СО₂ / г сухой почвы в час. Содержание углерода микробной биомассы (С_{микр}) рассчитывали как V_{СИД} (мкл СО₂/г почв./ч) × 40,04 + 0,37. Показатель стресса микробного сообщества (также называемый метаболическим коэффициентом, QR) рассчитывали как отношение БД почвы к СИД. Удельную скорость дыхания микробной биомассы (qCO₂) рассчитывали как отношение скорости БД к содержанию С_{микр}; данный коэффициент является важным индикатором эффективности использования субстрата [12].

Для определения активности азотфиксации применяли ацетиленовый метод [13]. Потенциальную активность азотфиксации выражали в мкг этилена на кг почвы в час [13]. Статистическую обработку данных проводили в программе Excel 2007.

Результаты и обсуждение. За три последние ротации севооборота в контрольном варианте наблюдалось снижение содержания гумуса от исходного при закладке опыта (2,20%) до 1,92%. Внесение навоза КРС 40 т/га замедлило этот процесс, но не компенсировало его полностью. Внесение

2. Биологические показатели состояния микробного сообщества пахотного слоя дерново-подзолистой почвы

Варианты опыта	$C_{орг}$, %	БД мкг CO_2-C / г · ч	СИД мкг CO_2-C / г · ч	QR	Азотфиксация, мкг C_2H_4 / кг · ч
Контроль	1,11	2,42	6,19	0,39	30,6
Навоз КРС 40 т/га	1,18	2,04	5,96	0,34	17,0
ОСВ 40 т/га	1,28	1,99	5,70	0,35	33,1
N60P60K60 – фон	1,20	1,67	3,84	0,44	14,5
Фон + навоз КРС 40 т/га	1,31	2,87	4,95	0,58	15,5
Фон + ОСВ 40 т/га	1,40	3,59	4,63	0,77	28,1

ОСВ в дозе 40 т/га 1 раз в ротацию севооборота позволило поддерживать содержание гумуса в почве, близком к начальному состоянию (2,12–2,20 %). Полное воспроизводство гумуса достигалось при сочетании органической и минеральной систем удобрений (табл. 1). Наибольшее влияние на фракционно-групповой состав гумуса оказало внесение органических удобрений на фоне минеральных. Отмечена тенденция к увеличению суммы гуминовых кислот с 0,31 до 0,37–0,38 % к массе почвы, фульвокислот с 0,35 до 0,40–0,42 % к массе почвы. Сочетание органической и минеральной систем удобрений привело к улучшению качества гумуса в пахотном горизонте почвы, способствовало усилению процесса гумусообразования (наблюдалась тенденция к расширению отношения $C_{гк} : C_{фк}$ с 0,89 до 0,91–0,93). Степень обогащенности органического вещества азотом (C:N) соответствовала 9–10.

Почва вариантов опыта различалась по содержанию органического углерода ($C_{орг}$) от 1,11% в контроле до 1,40% в варианте Фон + ОСВ 40 т/га. Совместное внесение минеральных и органических удобрений привело к увеличению $C_{орг}$ в вариантах Фон + навоз КРС 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га в сравнении с вариантом N60P60K60 – фон на 9% и 17% (табл. 2). Полученные данные по влиянию минеральных и органических удобрений на плодородие дерново-

подзолистой почвы согласуются с результатами исследований Зиняковой Н.Б. и Семенова В.М. [14], где было показано, что в серой лесной почве при минеральной системе удобрения вероятен недостаток легкоминерализуемого ОБ, который лишь частично устраняется использованием органоминеральной системы. Увеличение обеспеченности пахотных почв активным ОБ достигается использованием органической системы удобрения, либо путем перевода пахотных земель в залежь.

Полученные значения коэффициента микробного дыхания QR отражали нарушение устойчивости микробного сообщества во всех вариантах опыта (табл. 2). Коэффициент QR ранжирован для оценки устойчивости почв к техногенным воздействиям. Чем ниже показатель, тем меньше выявляется нарушений в качественном и количественном составе почвенной биоты. Согласно [15] величина QR в интервале от 0,1 до 0,2 свидетельствует о благоприятном состоянии почвенного микробного сообщества. Значение QR меньше 0,1 отражает недостаток питательных веществ в почве, величины превышающие 0,2–0,3 свидетельствуют о неблагоприятных климатических или антропогенных воздействиях на почву. Высокие (близкие к 1,0 и выше) значения QR указывают на интенсивное разложение органического вещества и нарушение стабильности почвенных биоценозов [15, 16]. Показатели QR при совместном использовании минеральных и органических

3. Удельное микробное дыхание (qCO_2) и доля микробного углерода ($C_{микр}$) в содержании общего ($C_{орг}$) и лабильного ($C_{лаб}$) органического углерода (извлекаемого раствором пирофосфата натрия) дерново-подзолистой почвы при использовании удобрений

Варианты опыта	$C_{микр}$, мкг/г	qCO_2 , мкг CO_2-C / мг $C_{микр}$ / ч	$C_{микр} / C_{орг}$, %	$C_{микр} / C_{лаб}$, %
Контроль	248	0,976	2,23	13,8
Навоз КРС 40 т/га	239	0,853	2,03	12,6
ОСВ 40 т/га	229	0,870	1,79	9,94
N60P60K60 – фон	154	1,08	1,29	7,34
Фон + навоз КРС 40 т/га	199	1,45	1,52	9,02
Фон + ОСВ 40 т/га	186	1,93	1,33	7,15

удобрений в вариантах Фон + навоз КРС 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га выявили сильную степень нарушений в структурно-функциональной организации микробных сообществ. Природа повышения коэффициента микробного дыхания в этих вариантах обусловлена, в первую очередь, резким снижением скорости СИД – в 1,3 и 1,3 раза, и повышением интенсивности БД в 1,2 и 1,5 раза, соответственно. Отмечено, что микробное продуцирование CO_2 дерново-подзолистой почвой при внесении только органических удобрений снижалось по сравнению с контрольным вариантом на 16% при внесении навоза КРС 40 т/га и на 18% при внесении ОСВ 40 т/га. Ранее было установлено, что увеличение содержания ОВ в почве в течение короткого срока после внесения органических удобрений связано с особенностями минерализационных процессов: наиболее доступные микроорганизмам компоненты навоза минерализуются, а грубодисперсные и отмершие растительные остатки накапливаются в виде детрита [15].

В дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при внесении ОСВ 40 т/га было отмечено повышение азотфиксирующей активности на 8% по сравнению с контрольным вариантом, а при сочетании ОСВ 40 т/га с N60 P60 K60 – снижение на 9% (табл. 2). Использование только минерального фона N60 P60 K60 или навоза КРС 40 т/га, а также совместное их применение приводило к снижению биологической фиксации азота в сравнении с контролем в 2,1, 1,8, 2,0 раза соответственно.

Наиболее высокое содержание микробного углерода при использовании удобрений зафиксировано в варианте навоз КРС 40 т/га и было ниже, чем в контроле на 10% (табл. 3). При использовании ОСВ 40 т/га происходило снижение $C_{\text{микр}}$ в 1,3 раза в сравнении с контролем.

Внесение одних минеральных удобрений и их сочетание с органическими в вариантах Фон + навоз КРС 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га приводило к снижению $C_{\text{микр}}$ в 1,7, 1,5 и 1,7 раза соответственно. Доля микробного углерода в содержании лабильного органического углерода ($C_{\text{лаб}}$), извлекаемого раствором пирофосфата натрия, в варианте с внесением навоза КРС 40 т/га снижалась на 9 % по сравнению с контролем. Внесение органического вещества в форме ОСВ 40 т/га и сочетание минеральных и органических удобрений в варианте Фон + ОСВ 40 т/га приводило к снижению содержания $C_{\text{микр}}$ в $C_{\text{лаб}}$ в сравнении с контролем в 1,4 и 1,9 раза.

Внесение органических удобрений приводило к снижению метаболического коэффициента qCO_2 в вариантах КРС 40 т/га и ОСВ 40 т/га в 1,14 и 1,12 раза по сравнению с контролем. Сочетание минеральных и органических удобрений в вариантах

Фон + навоз КРС 40 т/га и Фон + ОСВ 40 т/га повышало значение qCO_2 в сравнении с контролем в 1,5 и 2,0 раза.

Заключение. Длительное возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте в течение 40 лет без внесения удобрений привело к снижению содержания гумуса на 13 %. Максимальное положительное влияние на трансформацию органического вещества в почве и её азотный режим наблюдалось при длительном применении органических удобрений на фоне минеральных. Установлено повышение уровней гумуса и общего азота в варианте Фон + ОСВ 40 т/га по сравнению с контролем в 1,3 и 1,2 раза. Биологические показатели состояния микробного сообщества пахотного слоя дерново-подзолистой почвы (БД, СИД, QR) возрастали при совместном внесении минеральных и органических удобрений. Во всех вариантах длительное внесение удобрений приводило к усилению процесса минерализации почвенного органического вещества, причем максимальное снижение содержания микробной биомассы (в 1,8 раза по сравнению с контролем) происходило на фоне N60 P60 K60. Значения микробного метаболического коэффициента указывают на среднее и сильное нарушение устойчивости микробных сообществ, сформировавшихся (сложившихся) при длительном применении органических и минеральных удобрений в агроценозах на дерново-подзолистых почвах. При совместном внесении в почву навоза КРС 40 т/га и N60 P60 K60 отмечено снижение интенсивности азотфиксации в 2 раза по сравнению с контролем.

Таким образом, при длительном сельскохозяйственном использовании дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в условиях Предуралья возможно поддержание плодородия при ведении зерно-паро-травяно-пропашного севооборота с использованием системы органических и минеральных удобрений. Систематическое совместное применение органических и минеральных удобрений приводит к изменению структурно-функциональной организации микробных сообществ и снижению их метаболической активности. С поступлением в почву новых органических компонентов из навоза или ОСВ происходит подавление процессов минерализации гуминовых веществ аборигенными микроорганизмами, деструкция органических компонентов ОСВ и навоза осуществляется другими физиологическими группами микроорганизмов. Появление новых микробных популяций вместе с органическими удобрениями в агросистеме приводит к нарушению устойчивости почвенных микробценозов. Следовательно, увеличивая и поддерживая на определенном уровне количество легкоминерализуемых веществ, можно повышать потенциал почвенного плодородия, в том числе и эффективного.

Литература:

1. Минеев В.Г., Козлова Ю.Е., Кураков А.В., Гомонова Н.Ф., Звягинцев Д.Г. Влияние последствий минеральных удобрений на микробиологические и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Докл. РАСХН. – 2001. – № 4. – С. 19–21.
2. Мосина Л.В., Мёрзлая Г.Е. Экологическая оценка влияния органических и минеральных удобрений на микрофлору дерново-подзолистой почвы и продуктивность агроценозов в экстремальных погодных условиях // Известия ТСХА. – 2013. – Вып. 5. – С. 5–18.
3. Чернов Т.И., Холодов В.А., Козут Б.М., Иванов А.Л. Методология микробиологических исследований почвы в рамках проекта «Микробиом России» // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2017. – Вып. 87. – С. 100–113.
4. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России [отв. ред. Г.А. Заварзин]. – М.: Наука, 2007. – 315 с.
5. Умаров М.М., Кураков А.В., Степанов А.Л. Микробиологическая трансформация азота в почве. – М.: ГЕОС, 2007. – 136 с.
6. Котлярова О.Г., Чернявский А.Н., Чернявский К.Н. Азотфиксация в посевах бобовых культур в зависимости от способов обработки почвы и удобрения // Агрохимия. 2007. – № 8. – С. 64–70.
7. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 Охрана природы (ССОП). Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200017708>. Дата обращения: 16.05.18.
8. СанПиН 2.1.7.573-96 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000109>. Дата обращения: 16.05.18.
9. Практикум по агрохимии [Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева]. – М.: Изд. МГУ, 2001. – 689 с.
10. Методы определения активных компонентов в составе гумуса. – М.: ВНИИА, 2010. – 34 с.
11. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. – 2011. – № 11. – С. 1327–1333.
12. Жукова А.Д., Хомяков Д.М. Показатели микробного дыхания в почвенном покрове импактной зоны предприятия по производству минеральных удобрений // Почвоведение. – 2015. – № 8. – С. 984–992.
13. Эмер Н.Р., Семёнов А.М., Зелёнов В.В., Зинякова Н.Б., Костина Н.В., Голиченков М.В. Ежесуточная динамика численности и активности азотфиксирующих бактерий на участках залежной и интенсивно возделываемой почвы // Почвоведение. – 2014. – № 8. – С. 963–970.
14. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Функциональное состояние органического вещества серой лесной почвы при разных системах удобрения сельскохозяйственных культур // Проблемы агрохимии и экологии. – 2013. – № 1. – С. 3–8.
15. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н. Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 205–210.
16. Вершинин А.А., Петров А.М., Юронец-Лужаева Р.Ч., Кузнецова Т.В., Хабибуллин Р.Э. Коэффициент микробного дыхания различных типов почв в условиях нефтяного загрязнения // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 103–106.

Kovalevskaya N.P., Zav'yalova N.E., Sharavin D.Y., Vasbieva M.T.

PECULIARITIES OF SODDY-PODZOLIC HEAVY LOAM SOIL MICROBIOCENOSIS UNDER LONG-TERM APPLICATION OF MINERAL AND ORGANIC FERTILIZATION SYSTEMS

A long-term stationary field experiment was launched to study the effect of organic and mineral fertilizers on microbiocenosis of Perm Krai soddy-podzolic soils. The microbial respiration coefficient QR of samples revealed the degradation of soddy-podzolic soils' microbial community in treated trials. The portion of the microbial carbon in the total carbon content of soil upper layer was 1.29–2.23 percent. The highest values of that index were found in the absence of fertilizers. Combination of mineral and organic fertilizers (40 t/ha of cow manure or sewage sludge) enhanced the metabolic coefficient qCO_2 in comparison with control sample up to 1.5 and 2.0 times respectively. The highest values of biological nitrogen fixation (33.1 and 28.1 $\mu g C_2H_4/kg\cdot h$) were shown in the variants with sewage sludge 40 t/ha and mineral fertilizer+sewage sludge 40 t/ha.

Keywords: soddy-podzolic soil, organic-mineral fertilizers, soil microbiocenosis, microbial biomass carbon, microbial respiration coefficient, nitrogen fixation