

УДК 631.46:631.445.25(470.314)

МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРОФОНОВ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ПО СОВОКУПНОСТИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Зинченко М.К., Зинченко С.И.

*ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»,
Суздаль, e-mail: popel62@yandex.ru*

Исследования проводили в 2011–2018 гг. в полевом стационарном опыте на базе Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства (сейчас Верхневолжский ФАНЦ). Почвенные образцы отбирали в мае, июле и сентябре из слоя почвы 0–20 см на различных фонах интенсификации применения удобрений (нулевым, интенсивном, интенсивном минеральном, высокоинтенсивном минеральном, интенсивном органоминеральном, высокоинтенсивном органоминеральном). В качестве диагностических показателей экологического состояния серой лесной почвы использовали: общую численность микрофлоры, соотношение численности основных эколого-трофических групп микроорганизмов и активность почвенных ферментов. Общая численность пула микроорганизмов рассчитывалась из суммы жизнеспособных клеток аммонификаторов, иммобилизаторов минерального азота, олигонитрофилов, микромицетов, актиномицетов и целлюлозоразлагающих микроорганизмов. Существенное снижение общей численности микрофлоры наблюдается на высокоинтенсивном минеральном фоне – 9,7 млн КОЕ/1г почвы. Микробиологические коэффициенты (K_{мин.} = 1,40; K_{т.} = 5,12; K_{гн.} = 0,65) свидетельствуют, что в почве этого варианта преобладают процессы минерализации органического вещества над их синтезом. На высокоинтенсивном минеральном фоне наблюдалось снижение активности группы окислительно-восстановительных ферментов, особенно полифенолоксидазы, на 37% по сравнению с залежью. Это свидетельствует о замедлении процессов синтеза гумусовой фракции органического вещества относительно природных аналогов и других агрофонов. Уменьшение общей численности микрофлоры, изменения таксономической структуры микробных ассоциаций, их биохимической и функциональной деятельности, при длительном использовании минеральной системы удобрений, позволяет прогнозировать снижение экологической устойчивости на высокоинтенсивном минеральном фоне. На органоминеральных фонах средний пул микрофлоры составил 13,6 млн и относительно высокие значения K_{т.} и K_{гн.}, что показывает характер микробиологических и биохимических процессов, направленный на синтез почвенного органического вещества.

Ключевые слова: серая лесная почва, микроорганизмы, микробный пул, ферментативная активность, экологическая устойчивость, фоны интенсификации

MONITORING OF ECOLOGICAL CONDITION OF SOIL FERTILITY OF GRAY FOREST SOIL BASED ON THE COMBINATION OF MICROBIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS

Zinchenko M.K., Zinchenko S.I.

*Federal State Budget Scientific Institution «Upper Volga Federal Agrarian Research Center»,
Suzdal, e-mail: popel62@yandex.ru*

Research was conducted in 2011–2018 in the stationary field experiment of the Vladimir Research Institute of Agriculture (today known as the Upper Volga Federal Agrarian Research Center). Soil samples were taken in May, July, and September from a soil layer of 0–20 cm with different intensification backgrounds of fertilizer application (zero, intensive, intensive mineral, high-intensity mineral, intensive organic and mineral, high-intensity organic, and mineral). The following indicators of ecological condition of gray forest soil we used as diagnostic ones: the total bacterial population, the ratio of the population of main ecological and trophic microorganism groups and the activity of soil enzymes. The total population of microorganisms pool was calculated based on the sum of viable cells of ammonifiers, immobilizers of mineral nitrogen, oligonitrophils, micromycetes, actinomycetes and cellulose-decomposing microorganisms. A significant decrease in the total number of microflora population is observed with high intensity mineral fertilization background of 9.7 million CFU/gm soil. Microbiological coefficients of mineralization, transformation, and soil humification (K_{min.} = 1.40; K_{t.} = 5.12; K_{sm.} = 0.65) indicate that this soil sample features processes of organic matter mineralization prevailing over their synthesis. High intensity fertilization showed lower activity of redox enzyme group, especially that of polyphenol oxidase, being 37% lower than in case of lealand. This indicates a reduction in synthesis of humic fraction of organic matter relative to natural analogues and other agricultural background. The decrease in the total number of microflora population, changes in the taxonomic structure of microbial associations, their biochemical and functional activities, with long-term use of mineral fertilizers, let us predict a decrease in environmental sustainability on a high-intensity mineral background. The average population of microflora pool on organic and mineral backgrounds was 13.6 million along with relatively high values of K_{t.} and K_{sh.}, which shows the nature of microbiological and biochemical processes aimed at the synthesis of soil organic matter.

Keywords: gray forest soil, microorganisms, microbial pool, enzymatic activity, ecological sustainability, intensification backgrounds

Плодородие – это многопараметрический показатель, количественные и качественные характеристики которого отражают особенности функционирования конкретной почвы, ее внутреннюю структуру и внешние связи. Именно поэтому совокупность корректирующих друг друга микробиологических и биохимических по-

казателей позволяет полнее и объективнее оценить эффективность применяемых систем удобрений и обработки, экологическое состояние изучаемых агрофонов [1]. В условиях антропогенного воздействия в почвах происходит существенная перестройка не только таксономической структуры микробных ассоциаций, но и их биохимической или функциональной деятельности.

Для обеспечения рационального использования земельных ресурсов, оценки его качества необходимо создание системы микробиологического мониторинга. Особенно это важно при экологизации земледелия, связанного с переводом его на адаптивно-ландшафтную основу и формированием экологически сбалансированных ландшафтов [2, 3]. Проектирование экологических сбалансированных агроландшафтов должно проводиться с учетом нормирования антропогенных нагрузок. Следует отметить, что эта проблема актуальна, давно назрела, теоретически и практически значима, имеются определенные научные предпосылки для ее решения.

Выработать микробиологические критерии, определяющие экологическое состояние почв, очень трудно из-за гетерогенности объекта исследования, высокой динамичности биохимических процессов, неустойчивости структуры микробного сообщества, различий гидротермического режима почв. Поэтому только по совокупности микробиологических показателей, в комплексе с другими параметрами плодородия, можно диагностировать уровень окультуренности и экологическое состояние почвы [4, 5].

Для оценки биологического состояния серой лесной почвы агроландшафтов в лаборатории микробиологии Верхневолжского ФАНЦ проводятся исследования по широкому спектру показателей [6, 7].

Цель исследования. Провести мониторинг агроэкологического состояния серой лесной почвы агроландшафтов на основе микробиологических и биохимических показателей.

В качестве диагностических показателей экологического состояния серой лесной почвы мы использовали: общую численность микрофлоры, соотношение численности основных эколого-трофических групп микроорганизмов и активность почвенных ферментов.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в многолетнем полевом стационарном опыте на базе Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Опыт по изучению и усовершенствованию адаптивно-ландшафтных систем земледелия заложен в 1996 г. Тип агроландшафта полевой, расположенный на плакоре со слабой (около 1°) западной экспозицией склона. Микробиологические исследования проводили на фонах, представленных в табл. 1.

Органические удобрения (подстильный навоз) вносили один раз в ротацию севооборота полной дозой в черный и занятый пар перед посевом озимой пшеницы.

Дозы удобрений на фонах интенсификации рассчитывались балансовым методом с учетом естественного плодородия на четыре уровня продуктивности сельскохозяйственных культур: низкий – 1,8–2,0 т/га з.е.; средний – 2,0–2,2 т/га з.е.; интенсивный – 2,7–4,1 т/га з.е.; высокоинтенсивный – 3,7–4,5 т/га з.е. В качестве основной обработки применялась ежегодная отвальная вспашка (ОВ) на глубину 20–22 см. Мониторинг микробиологических и биохимических показателей проводили в период с 2011 по 2018 г.

Таблица 1

Изучаемые варианты опыта

Система удобрений	Фон интенсификации					
	*Н	И	ИМ	ВИМ	ИОМ	ВИОМ
Количество удобрений, поступивших в почву за ротацию 6-польного севооборота, кг д.в./га	Навоз 40 т/га	Навоз 40 т/га + + N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₆₀	N ₃₅₀ P ₂₂₀ K ₃₉₀	N ₄₈₀ P ₂₈₀ K ₅₇₅	Навоз 60 т/га + + N ₃₁₀ P ₁₅₀ K ₃₁₀	Навоз 80 т/га + + N ₄₃₀ P ₁₆₀ K ₃₆₀

Примечание. *Н – нулевой фон; И – интенсивный; ИМ – интенсивный минеральный; ВИМ – высокоинтенсивный минеральный; ИОМ – интенсивный органоминеральный; ВИОМ – высокоинтенсивный органоминеральный.

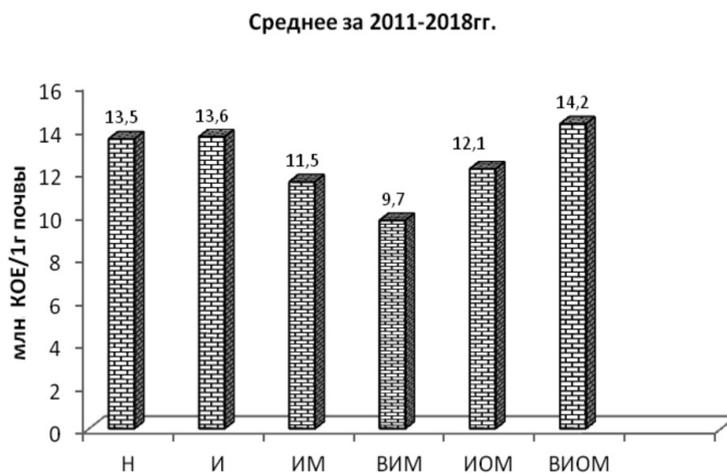


Рис. 1. Общая численность микрофлоры в зависимости от фонов интенсификации

Почвенный покров опытного участка представлен серой лесной слабоподзоленной среднесуглинистой почвой. Содержание гумуса в пахотном слое (0–20 см) варьирует от 3,9 до 4,2% (по Тюрину), обеспеченность подвижным фосфором (по Кирсанову) – 100–150 мг/кг почвы, обменным калием (по Масловой) – 100–120 мг/кг почвы, pH_{kcl} – от 5,9 до 6,3. Почвенные образцы отбирали в мае, июле и сентябре из слоя почвы 0–20 см.

В течение вегетационного периода лет исследования наблюдались существенные колебания погодных условий, особенно по равномерности выпадения осадков.

Количество выпавших осадков за вегетационный период лет исследования изменялось в 1,5 раза и было в диапазоне от 285 до 431 мм. Средняя величина ГТК = 1,42 и была на уровне среднемноголетней, соответствующая достаточному показателю увлажнения, что является типичным для зоны Владимирского ополья. Высоким увлажнением со значениями ГТК выше 1,7 характеризовались 2013 и 2017 гг. То есть отдельные периоды исследований характеризовались избыточным количеством осадков или их недостатком, что отражалось на влажности почвы и влияло на численность микробного пула и его биологическую активность.

Микробиологические исследования проводили согласно общепринятым в микробиологии и биохимии методикам [8, 9].

Результаты исследования и их обсуждение

Микробсоенотозы являются не только самой активной структурной единицей экоси-

стемы, но и наиболее динамичной. Общая численность пула агрономически значимых эколого-трофических групп микроорганизмов в серой лесной почве рассчитывалась из суммы жизнеспособных клеток аммонификаторов, иммобилизаторов минерального азота, олигонитрофилов, микромицетов и актиномицетов, целлюлозоразлагающих микроорганизмов. На величину пула активной микрофлоры оказывали влияние меняющиеся абиотические условия лет исследования и агротехнические факторы. Однако в величине микробного пула отмечен определенный тренд. Средний пул активной микрофлоры за период наблюдений на органоминеральных фонах составил 13,6 млн КОЕ/1г почвы, а на минеральных 10,6 млн (при $НСР_{05} = 1,1$). Действие навоза в дозах 40, 60, и 80 т/га положительно влияет на развитие микробного комплекса серой лесной почвы.

В то же время существенное снижение общей численности микрофлоры наблюдается на высокоинтенсивном минеральном фоне по отвальной вспашке – 9,7 млн КОЕ/1 г почвы (рис. 1).

Уменьшение общей численности микрофлоры при длительном использовании минеральной системы удобрений позволяет прогнозировать снижение экологической устойчивости на высокоинтенсивном минеральном фоне с использованием отвальной вспашки в качестве основной обработки.

Об этом свидетельствуют и рассчитанные микробиологические и биохимические индексы, основанные на численности аминокетотрофной и аминоавтотрофной микрофлоры (табл. 2). На высокоинтенсивном

минеральном фоне, при самом высоком коэффициенте минерализации ($K_{\text{мин.}} = 1,40$), установлены минимальные значения коэффициентов гумусонакопления ($K_{\text{гн.}} = 0,65$) и трансформации органических остатков в органическое вещество почвы ($K_{\text{т.}} = 5,12$). В почве этого варианта преобладают процессы минерализации органического вещества, что способствует снижению плодородия и экологической устойчивости агрофона.

На интенсивном фоне и высокоинтенсивном органоминеральном фоне определены коэффициенты минерализации на уровне 1, что характеризует сбалансированность процессов микробиологической минерализации и синтеза органического вещества почвы. Вместе с тем на этих фонах относительно высокие значения $K_{\text{т.}}$ и $K_{\text{гн.}}$, что показывает характер микробиологических и биохимических процессов, направленный на синтез почвенного органического вещества.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что использование микробиологических индексов дает возможность оценить характер и интенсивность процессов трансформации и превращения органических веществ в почве агроландшафтов и выявить наиболее выраженные зоны риска в экологическом состоянии и плодородии серой лесной почвы.

В качестве диагностического показателя мы использовали ферментативную активность почвы. Исследовали активность окислительно-восстановительных (каталазы, полифенолоксидазы, пероксидазы) и гидролитических (инвертазы, уреазы, фосфа-

тазы) ферментов. Активность изученных ферментов выражена в разных единицах и представлена количеством превращенного субстрата за единицу времени.

Для анализа и сравнения подобных экспериментальных данных мы использовали метод Дж. Ацци [10], который позволяет выразить изучаемые характеристики в относительных единицах (%) по отношению к контролю (почве залежи).

Установлено, что средний показатель ферментативной активности изучаемых агрофонов превышает или находится на уровне почвы природных аналогов (рис. 2). То есть агрогенная нагрузка, в рамках проводимых исследований, не оказала отрицательного воздействия на общий уровень ферментативной системы серой лесной почвы.

Однако на высокоинтенсивном минеральном фоне наблюдалось снижение активности группы окислительно-восстановительных ферментов, особенно полифенолоксидазы, на 37% по сравнению с залежью. Это свидетельствует о замедлении процессов синтеза гумусовой фракции органического вещества на этом фоне относительно природных аналогов и других агрофонов. Противоположная закономерность выявлена на интенсивном фоне и высокоинтенсивном органоминеральном фоне, где процент активности полифенолоксидазы на 42% выше, чем в почве залежи. Возрастание активности этого фермента характеризует усиление процессов микробиологического синтеза гумусовых соединений в почве этих вариантов.

Таблица 2

Эколого-трофические индексы трансформации органического вещества на фонах интенсификации

Фон интенсификации	* $K_{\text{мин.}}$: КАА МПА	** $K_{\text{т.}}$: (МПА + КАА) x МПА КАА	** $K_{\text{гн.}}$: активность <u>полифенолоксидазы</u> активность пероксидазы
	2011–2018 гг.	2011–2018 гг.	2016–2018 гг.
Нулевой	1,18	10,21	0,60
Интенсивный	0,99	10,70	1,07
Интенсивный минеральный	1,21	7,19	0,74
Высокоинтенсивный минеральный	1,40	5,12	0,65
Интенсивный органоминеральный	1,02	11,19	0,82
Высокоинтенсивный органоминеральный	0,94	13,31	0,78

Примечание. $K_{\text{мин.}}$ – коэффициент минерализации; $K_{\text{т.}}$ – коэффициент трансформации органических остатков; $K_{\text{гн.}}$ – коэффициент гумусонакопления; МПА – мясопептонный агар; КАА – крахмало-аммиачный агар.

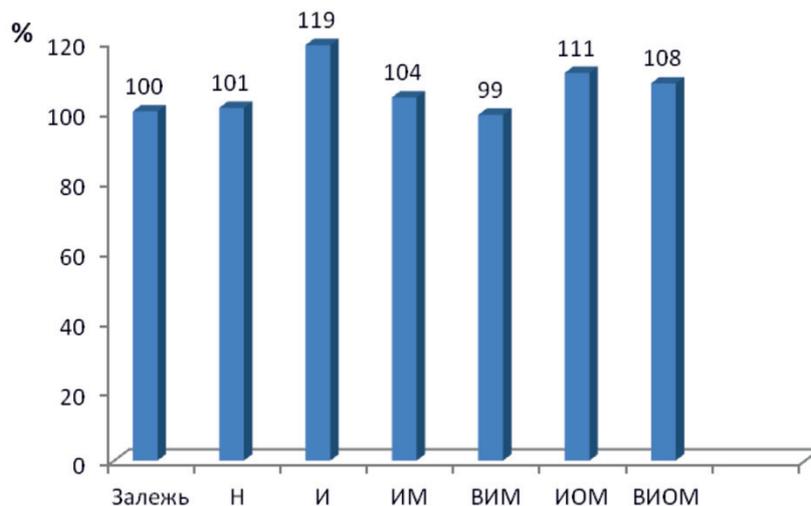


Рис. 2. Ферментативная активность (%) серой лесной среднесуглинистой почвы в зависимости от фона интенсификации

Сравнительный анализ показал, что самые высокие показатели ферментативной активности (119%) сформировались в почве интенсивного фона при использовании раз за ротацию севооборота навоза в дозе 40 т/га на фоне ежегодного внесения средних доз минеральных удобрений (NPK)₄₅₋₆₀.

На этом варианте активность изучаемых ферментов выше или находится на одном уровне с природными экосистемами. Близкие значения ферментативной активности получены на интенсивном органоминеральном и высокоинтенсивном органоминеральном фоне – 111 и 108% соответственно.

Следовательно, внесение навоза в дозе 40, 60 и 80 т/га на фоне ежегодного применения минеральных удобрений позволяет повысить общий ферментативный потенциал серой лесной почвы относительно природных аналогов и других фонов интенсификации.

Заключение

Таким образом, анализ данных микробиологического и биохимического мониторинга экологического состояния серых лесных почв агроландшафтов показывает, что наиболее обоснованной является органоминеральная система удобрений. Ответные реакции микроорганизмов на длительное применение высоких доз минеральных удобрений позволили выявить наиболее нарушенную экологическую зону, которая складывается на высокоинтенсивном минеральном фоне. Уменьшение об-

щей численности микрофлоры, изменения в таксономической структуре микробных ассоциаций, их биохимической и функциональной деятельности, при длительном использовании минеральной системы удобрений, позволяет прогнозировать снижение экологической устойчивости на минеральных фонах интенсификации по сравнению с органоминеральными фонами.

Список литературы / References

1. Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Панкратов Т.А., Лысак Л.В., Звягинцев Д.Г. Оценка разнообразия почв: эволюция подходов и методов // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1222–1232.
2. Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Pankratov T.A., Lysak L.V., Zvyagintsev D.G. Assessment of the bacterial diversity in soils: Evolution of approaches and methods // Eurasian Soil Science. 2009. Т. 42. № 10. P. 1138–1147. DOI: 10.1134/S106422930910008.
3. Пинчук И.П., Полянская Л.М., Кириллова Н.П., Степанов А.Л. Особенности формирования микробного сообщества дерново-подзолистой почвы в процессе вегетации ячменя (*Hordeum vulgare* L.) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1498–1505. DOI: 10.1134/S0032180X18120092.
4. Pinchuk I.P., Polyanskaya L.M., Kirillova N.P., Stepanov A.L. Features of formation of microbial community of the cespitose podsolch soil in the course of vegetation of barley (*Hordeum vulgare* L.) // Pochvovedenie. 2018. № 12. P. 1498–1505 (in Russian).
5. Полянская Л.М., Ломакин Д.Г., Чернов И.Ю. Численность и биомасса микроорганизмов в древних погребенных и современных черноземах разного землепользования // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1191–1204. DOI: 10.7868/S0032180X16100117.
6. Polyanskaya L.M., Lomakin D.G., Chernov I.Yu. The number and biomass of microorganisms in ancient buried and recent chernozems under different land uses // Eurasian Soil Science. 2016. Т. 49. № 10. P. 1122–1135. DOI: 10.1134/S1064229316100100.
7. Судницын И.И., Степанов А.Л. Почва – вода – растения – микроорганизмы. Palmarium Academic Publishing, 2014. 229 с.

Sudnitsyn I.I., Stepanov A. L. The soil – water – plants – microorganisms. Palmarium Academic Rublising, 2014. 229 p. (in Russian).

5. Рабинович Г.Ю. Применение метода биоиндикации для оценки состояния мелиорированных земель // Тенденция развития агрофизики в условиях изменяющегося климата: материалы Международной конференции к 80-летию АФИ. СПб., 2012. С. 367–371.

Rabinovich G.Yu. Application of a method of bioindication for assessment of a condition of the reclaimed lands//the Trend of development of agrophysics in the conditions of the changing climate: materials of the international conference for the 80 anniversary of AFI. SPb., 2012. P. 367–371 (in Russian).

6. Зинченко М.К., Зинченко С.И. Ферментативный потенциал агроландшафтов серой лесной почвы Владимирского ополья // Успехи современного естествознания. 2015. № 1–8. С. 1319–1323.

Zinchenko M.K., Zinchenko S.I. Fermentativny Activity of Grey Lesney Soils of Agrolandscapes of the Vladimir Opolya // Advances in current natural sciences. 2015. № 1–8. P. 1319–1323 (in Russian).

7. Зинченко М.К., Шаркевич В.В., Федулова И.Д. Микробиологические аспекты адаптивно-ландшафтного земледелия в зоне Владимирского ополья // Владимирский земледелец. 2018. № 1. С. 14–19.

Zinchenko M.K., Sharkevich V.V., Fedulova I.D. Microbiological Aspects of Adaptive-Landscape Farming in the Zone of the Vladimir Opolie // Vladimirskij zemledelec. 2018. № 1. P. 14–19 (in Russian).

8. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа. 2004. 255 с.

Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Workshop on microbiology. M.: Drofa, 2004. 255 p. (in Russian).

9. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology. M.: Nauka, 2005. 252 p. (in Russian).

10. Аззи Д. Сельскохозяйственная экология. М., 1959. 479 с.

Azzi D. Agricultural Ecology. M., 1959. 479 p. (in Russian).