

Агропочвоведение и агроэкология

УДК 631.465:631.445.25

DOI: 10.31857/S2500262724010079, EDN: CTPNNC

**ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ В АГРОЛАНДШАФТАХ
ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ****М. К. Зинченко**, кандидат биологических наук,
С. И. Зинченко, доктор сельскохозяйственных наук*Верхневолжский федеральный аграрный научный центр,
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, ул. Центральная, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru*

Исследования проводили с целью изучения ферментативной активности серой лесной почвы (СЛ) и серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ) в зависимости от систем удобрений в агроландшафтах во Владимирской области. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в стационарном полевом опыте на двух почвенных разностях. Изучали следующие фоны интенсификации применения удобрений (за ротацию 6-польного севооборота): нулевой (Н) – навоз 40 т/га; интенсивный (И) – навоз 40 т/га + $N_{100}P_{80}K_{160}$; интенсивный минеральный (ИМ) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; высокоинтенсивный минеральный (ВИМ) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; интенсивный органоминеральный (ИОМ) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + навоз 60 т/га; высокоинтенсивный органоминеральный (ВИОМ) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + навоз 80 т/га. На изучаемых фонах применения удобрений в СЛ ВГГ выявлен устойчивый тренд повышения активности каталазы и инвертазы. Средняя активность каталазы в почве второго гумусового горизонта была на 23 % выше, чем в СЛ, на той же глубине (20...40 см). Максимальная в эксперименте активность каталазы отмечена на интенсивном фоне (И) в СЛ ВГГ: слой 0...20 см – 2,41 мл О₂/г; 20...40 см – 1,96 мл О₂/г. Инвертазная активность в почве со вторым гумусовым горизонтом на глубине 20...40 см в среднем на 30 % выше, чем в серой лесной почве. Самая высокая величина этого показателя отмечена в почве двух почвенных разностей на интенсивном фоне в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г за 40 ч. Среднее содержание гумуса во втором гумусовом горизонте СЛ ВГГ находилось на уровне 3,76 %, что на 33 % выше, чем в СЛ в слое 20...40 см. Максимальная в эксперименте (слой 0...40 см) величина этого показателя отмечена в СЛ ВГГ на интенсивном фоне применения удобрений – 4,86 %.

**FEATURES OF ENZYMATIC ACTIVITY OF SOILS IN AGRICULTURAL LANDSCAPES OF THE
VLADIMIR HIGH PLAINS****M. K. Zinchenko, S. I. Zinchenko***Upper Volga Federal Agrarian Scientific Center
601261, Vladimirskaya obl., Suzdal'skii r-n, pos. Novyi, ul. Tsentral'naya, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru*

The research aimed to study the enzymatic activity of grey forest soil (GF) and grey forest soil with a second humic horizon (GF SHH) depending on fertilizer systems in agricultural landscapes in the Vladimir region. The work was carried out in 2021–2023 in a stationary field experiment on two soil varieties. The following backgrounds for intensifying the use of fertilizers were studied (for rotation of a 6-field crop rotation): zero (Z) – manure 40 t/ha; intensive (I) – manure 40 t/ha + $N_{100}P_{80}K_{160}$; intense mineral (IM) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; high-intensity mineral (HIM) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; intensive organomineral (IOM) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + manure 60 t/ha; high-intensity organomineral (VIOM) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + manure 80 t/ha. Against the studied backgrounds of fertilizer use in the GF SHH, a stable trend of increasing the activity of catalase and invertase was revealed. The average activity of catalase in the soil of the second humus horizon was 23 % higher than in the GF, at the same depth (20–40 cm). The maximum catalase activity in the experiment was observed against an intense background (I) in the GF SHH: layer 0–20 cm – 2.41 ml O₂/g; 20–40 cm – 1.96 ml O₂/g. Invertase activity in soil with a second humus horizon at a depth of 20–40 cm is on average 30 % higher than in grey forest soil. The highest value of this indicator was observed in the soil of two soil phases against an intense background in the 0–20 cm layer – 3.50–3.55 mg of glucose/g in 40 hours. The average humus content in the second humus horizon GF SHH was at level 3.76 %, which was 33 % higher than in GF in a layer of 20–40 cm. The maximum value of this indicator in the experiment (layer 0–40 cm) was observed in GF SHH against the intensive background of fertilizer use – 4.86 %.

Ключевые слова: ферментативная активность каталазы и инвертазы, почвенные разности, серая лесная почва, второй гумусовый горизонт.

Key words: enzymatic activity of catalase and invertase, soil varieties, grey forest soil, second humic horizon.

Среди различных биологических критериев оценки экологического состояния почв наиболее чувствительным показателем выступает активность почвенных ферментов [1, 2]. Биологическая активность почвы обусловлена суммарным содержанием в почве определенного запаса ферментов, как выделенных в процессе жизнедеятельности растений и микроорганизмов, так и аккумулированных почвой после разрушения отмерших клеток микроорганизмов. Плодородие почвы тесно

связано с ферментативной активностью, которая может существенно изменяться в зависимости от вида возделываемой культуры, способа обработки почвы и степени ее удобренности [3, 4]. Гидролитические ферменты (инвертаза, уреазы, фосфатаза и др.) определяют интенсивность мобилизационных процессов в почве, в то время как окислительно-восстановительные (каталаза, полифенолоксидаза, пероксидаза и др.) участвуют в синтезе и распаде гумусовых веществ. Процессы мобилизации

органических веществ, связанные с высвобождением доступных форм азота, фосфора и других элементов, представляют большой интерес с точки зрения оценки плодородия почвы и экологической устойчивости агроландшафтов.

Основными структурообразующими агрокомпонентами почвенного покрова Владимирского Ополя выступают серые лесные (обычные, остаточные-карбонатные, со вторым гумусовым горизонтом), а также серые лесные глееватые и эродированные почвы [5]. Они интересны отчетливо выраженной разницей физико-химических свойств отдельных горизонтов почвенного профиля, что отражается в особенностях структуры, строения порового пространства, содержания органического углерода, теплоемкости, теплопроводности и других свойств. Изменение водного, воздушного и питательного режимов почвенных разностей, которое особенно резко происходит в почвах агроэкосистем, существенным образом сказывается на их биологической активности, которую определяет интенсивность микробиологических и биохимических процессов. Однако особенности функционирования микробиоты и ее ферментативной активности в различных комплексах серых лесных почв пашни до сих пор не получили всесторонней оценки. Это лишает практиков возможности применения биологически и экологически обоснованных приемов регулирования плодородия почвы.

Цель исследования – оценить особенности ферментативной активности почвенных разностей (серой лесной почвы и серой лесной со вторым гумусовым горизонтом) в зависимости от фона интенсификации применения удобрений.

Методика. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в стационарном многофакторном полевом опыте по изучению и усовершенствованию адаптивно-ландшафтных систем земледелия в зоне Владимирского Ополя, заложенном в 1996 г. в отделе земледелия Владимирского научно-исследовательского института сельского хозяйства.

На территории стационарного опыта площадью около 3 га сотрудники РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева под руководством академика В. И. Кирюшина в 1996 г. провели крупномасштабную почвенную съемку. Почвенный покров опытного участка характеризовался высокой неоднородностью. На его площади было выделено 8 почвенных разностей. Более 40 % площади участка занимали типичные серые лесные почвы (СЛ) без видимых признаков оподзоленности в профиле. На типичные для Владимирской области серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ) приходилось 20,8 % [6]. Так как серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом обладают более высоким уровнем почвенного плодородия и выступают компонентом агроландшафтов, то представляет интерес детальное изучение их ферментативной активности в условиях длительного применения различных систем удобрения сельскохозяйственных культур.

Схема опыта включает четыре уровня интенсивности применения минеральных и органоминеральных систем удобрений, рассчитанных на достижение планируемой продуктивности возделываемых культур: нулевой (Н) – навоз 40 т/га; интенсивный (И) – навоз 40 т/га + $N_{100}P_{80}K_{160}$; высокоинтенсивный минеральный (ИМ) – $N_{350}P_{220}K_{390}$; высокоинтенсивный минеральный (ВИМ) – $N_{480}P_{280}K_{575}$; интенсивный органоминеральный (ИОМ) – $N_{310}P_{150}K_{310}$ + навоз 60 т/га; высокоинтенсивный органоминеральный (ВИОМ) – $N_{430}P_{160}K_{360}$ + навоз 80 т/га. Во всех вариантах общим фоном проводили еже-

годную плоскорезную обработку на глубину 10...12 см.

С учетом почвенной карты опытного участка микробиологические исследования осуществляли на двух почвенных разностях – серой лесной почве (СЛ) и серой лесной среднеоподзоленной почве со вторым гумусовым горизонтом (СЛ ВГГ). Образцы почвы для ферментативного анализа отбирали по вариантам опыта из слоев 0...20 и 20...40 см во второй декаде мая (после внесения азотных удобрений и посева), июля и сентября.

В почвенных образцах учитывали активность следующих ферментов [7]: каталазы – газометрическим методом А. Ш. Галстяна; инвертазы – титриметрическим методом И. Н. Ремейко, С. М. Малиновской; полифенолоксидазы (ПФО) и пероксидазы (ПД) – методом К. А. Козлова. Коэффициент гумусонакопления рассчитывали по активности ПФО и ПД по формуле $K_g = (ПФО/ПД)$ [8]. Содержание гумуса определяли методом И. В. Тюрина.

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с вычислением значений средних, отклонения от среднего, коэффициента вариации, НСР и использованием критерия Фишера для оценки существенности разности между средними.

Результаты и обсуждение. В основе синтеза гумусовых компонентов почвы лежат окислительно-восстановительные процессы, в которых участвуют ферменты класса оксидоредуктаз. Каталаза – это фермент, по активности которого судят о насыщенности почвы микроорганизмами при катализе реакции разложения перекиси водорода, как продукта их жизнедеятельности. Высокая активность этого фермента служит свидетельством напряженности энергетических процессов в почве, отражая уровень плодородия и характеризуя процессы биогенеза гумуса. Диапазон активности фермента в слое 0...20 см определялся значениями от 1,81 до 2,41 мл O_2 /г почвы, в слое 20...40 см – от 0,91 до 1,96 (табл. 1). Максимальная в эксперименте активность каталазы отмечена на интенсивном фоне (И) в СЛ ВГГ: в слое 0...20 см – 2,41 O_2 /г почвы; в слое 20...40 см – 1,96 мл O_2 /г почвы. В среднем активность каталазы в СЛ ВГГ была выше на всех фонах интенсификации. В слое почвы 0...40 см на интенсивном фоне разница составляла 13 %.

Табл. 1. Активность каталазы в почвенных разностях серой лесной почвы агроландшафтов в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.), мл O_2 /г почвы в минуту

Фон интенсификации применения удобрений	Слой почвы, см	СЛ	СЛ ВГГ
Н	0...20	2,0±0,51	1,87±0,52
	20...40	1,28±0,51	1,74±0,79
И	0...20	2,22±0,25	2,41±0,39
	20...40	1,43±0,29	1,96±0,61
ИМ	0...20	2,02±0,21	2,34±0,24
	20...40	1,47±0,12	1,47±0,46
ВИМ	0...20	1,99±0,55	2,33±0,36
	20...40	1,35±0,25	1,64±0,19
ИОМ	0...20	1,99±0,15	2,08±0,21
	20...40	1,32±0,37	1,61±0,13
ВИОМ	0...20	1,84±0,16	1,81±0,36
	20...40	0,91±0,24	1,55±0,28
Среднее по почвенной разности	0...20	2,00	2,14
	20...40	1,41	1,74

Локализация фермента в почве интенсивного фона обусловлена значительным микробным пулом и метаболической активностью различных эколого-трофических групп микрофлоры. Многолетнее использование средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза обусловило благоприятные условия для развития микро-

биоты почвы. На остальных фонах интенсификации статистически достоверных различий не обнаружено, но в течение 3-х лет сохранялся тренд повышения активности каталазы в СЛ ВГГ.

Второй гумусовый горизонт в почве опытного участка был отмечен в основном на глубине 20...40 см, имел различную мощность и протяженность. Он характеризовался повышенной активностью каталазы на всех фонах интенсификации (рис. 1). Средняя величина этого показателя для СЛ ВГГ была на 23 % выше, чем для СЛ на той же глубине.

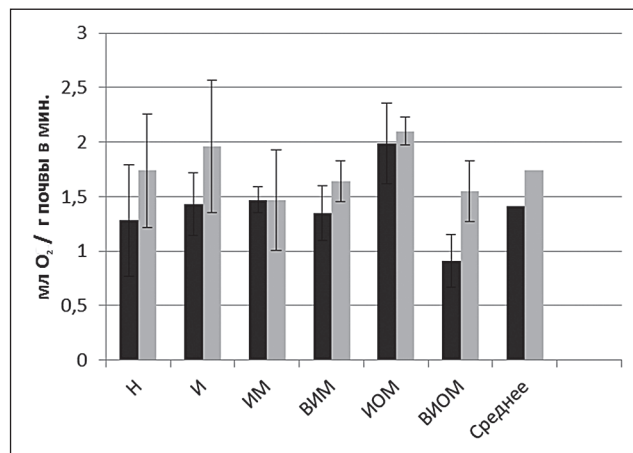


Рис. 1. Каталазная активность почвенных разностей агроландшафтов в слое 20...40 см в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Активность фермента ко времени репродуктивного периода развития сельскохозяйственных культур возрастала на обеих почвенных разностях. Это подтверждают и результаты исследований предыдущих лет [9]. На всех фонах интенсификации каталазная активность была выше в июле (табл. 2) и в профиле серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом, по сравнению с серой лесной почвой.

Табл. 2. Сезонная динамика активности каталазы в слое почвы 0...20 см в зависимости от почвенной разности и фона интенсификации применения удобрений (2022 г.), мл O₂/г почвы в мин.

Фон	СЛ			СЛ ВГГ		
	май	июль	сентябрь	май	июль	сентябрь
Н	1,37	1,73	1,77	1,40	1,70	1,77
И	1,97	2,17	1,80	2,17	2,57	1,93
ИМ	2,0	2,00	1,73	2,33	2,70	2,03
ВИМ	2,17	2,27	1,63	2,27	2,61	1,93
ИОМ	1,97	2,30	1,47	2,23	2,43	1,53
ВИОМ	2,13	2,40	1,53	2,33	2,40	1,90
$\bar{X}_s \pm S(X)$	1,94±0,29	2,18±0,23	1,66±0,13	2,12±0,36	2,40±0,36	1,85±0,18

Активность инвертазы определяется уровнем содержания органического вещества в почве, в частности, легкогидролизуемых углеводов, которые служат энергетическим материалом для многих почвенных гетеротрофов. Инвертаза, участвуя в расщеплении дисахаридов, играет важную роль в формировании предгумусовой фракции из разлагающейся растительной и микробной биомассы [9]. Показатель ее активности используют в оценке плодородия почв и при диагностике постагрогенных изменений экологического характера [10].

Наибольшая в эксперименте активность фермента в почвенных разностях отмечена в слое 0...20 см. В серой лесной почве средняя величина этого показателя состав-

ляла 3,16 мг глюкозы/г почвы за 40 ч, в серой лесной со вторым гумусовым горизонтом – 3,27 мг глюкозы/г почвы за 40 ч. Статистически достоверные различия в активности фермента между почвенными разностями отмечены в слое 20...40 см – 1,9 и 2,47 мг глюкозы/г почвы за 40 ч соответственно. Инвертазная активность второго гумусового горизонта была в среднем на 30 % выше, чем в серой лесной почве на глубине 20...40 см (рис. 2).

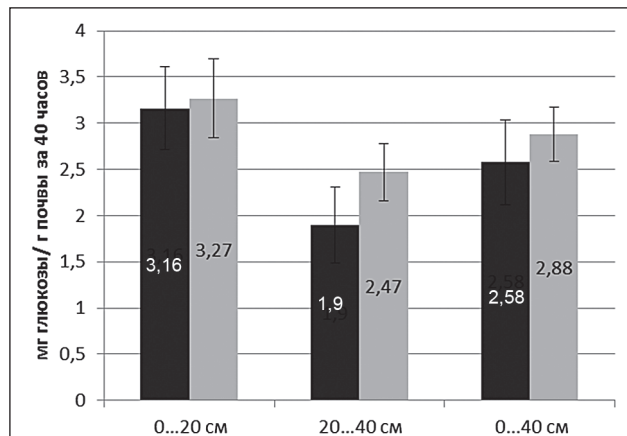


Рис. 2. Активность инвертазы в разностях серой лесной почвы (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Самая высокая активность инвертазы отмечена при использовании средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза за ротацию 6-польного севооборота в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г почвы за 40 ч. В слое 0...40 см на этом фоне она так же была повышенной (рис. 3).

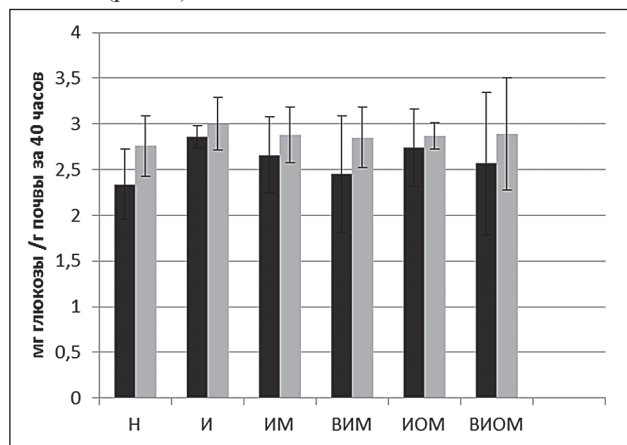


Рис. 3. Активность инвертазы в разностях серой лесной почвы в слое 0...40 см в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (среднее за 2021–2023 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Рассчитанные коэффициенты гумусонакопления (Кг) были меньше 1, то есть окислительно-восстановительные процессы в почве агрофонов ориентированы на минерализацию гумусовых веществ (рис. 4). Минимальные величины этого показателя отмечены в серой лесной почве на высокоинтенсивном минеральном фоне. Следовательно, трансформация органического вещества почвы, обусловленная активностью пероксидазы и полифенолоксидазы, активно смешалась к интенсивной минерализации гумуса, что отмечено в других исследованиях [11]. Аналогичная тенденция на этом фоне проявлялась и в СЛ ВГГ при более высоких значениях Кг–0,47. То есть использование минеральной системы удобрений может провоцировать биохимические процессы, снижающие гумусонакопление в агроландшафтах серой лесной почвы.

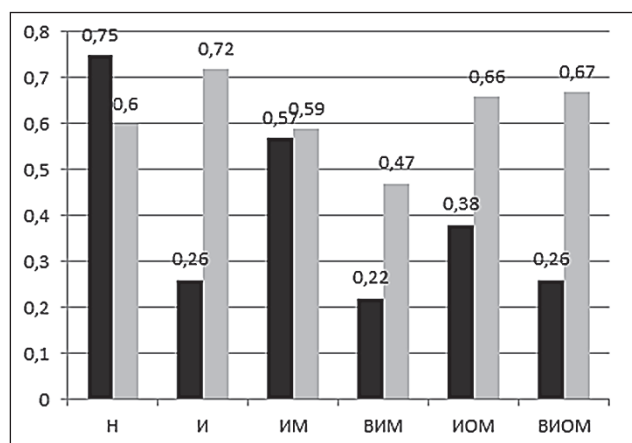


Рис. 4. Коэффициенты гумусонакопления в слое 0...40 см в зависимости от фонов интенсификации и почвенных разностей (среднее за 2021–2022 гг.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Коэффициенты гумусонакопления на органоминеральных фонах, преимущественно в СЛ ВГГ, достигали 0,66...0,72 ед. (см. рис. 4). Вероятно, при использовании комплекса органических и минеральных удобрений формируется биохимический потенциал, направленный на снижение активной минерализации составляющих высокомолекулярных гумусовых соединений, что определяет повышенный уровень ее экологической устойчивости. В целом, судя по величинам Кг, применение навоза в дозах 40, 60 и 80 т/га снижало процессы активной минерализации компонентов гумуса, по сравнению с использованием одних минеральных удобрений.

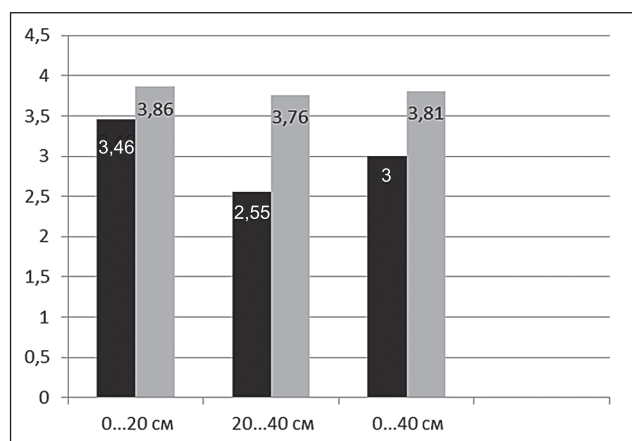


Рис. 5. Содержание гумуса в почвенных разностях серой лесной почвы (2022 г.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Содержание гумуса и запасы органического вещества – наиболее важные показатели плодородия и экологической устойчивости почв. Преимущество в накоплении гумуса имели СЛ ВГГ (рис. 5). Особенно в этом отношении выделялся второй гумусовый горизонт.

Содержание гумуса во втором гумусовом горизонте (20...40 см) находится на уровне пахотного слоя, что создает благоприятные условия для развития сельскохозяйственных растений. Среднее содержание гумуса в СЛ почве в слое 20...40 см было на 33 % ниже, чем во втором гумусовом горизонте.

Наибольшее содержание органического вещества отмечено на интенсивном (И) фоне. В этом варианте в СЛ ВГГ в слое 0...40 см оно достигало 4,86 % (рис. 6), в СЛ – 3,48 %. Полученные результаты согласуются

с данными других исследователей серых лесных почв Владимирского Ополя [12].

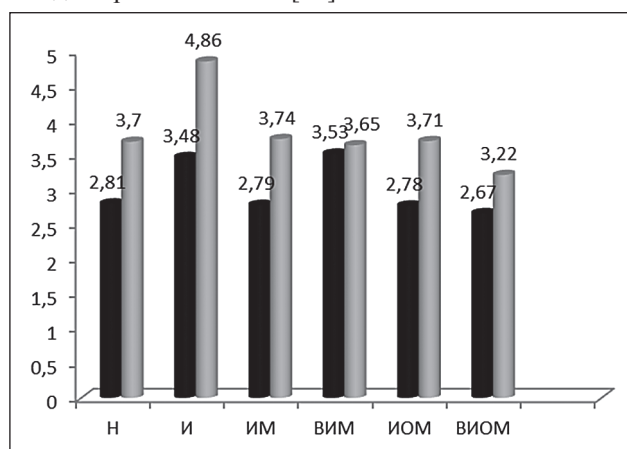


Рис. 6. Содержание гумуса в слое 0...40 см почвенных разностей серой лесной почвы в зависимости от фона интенсификации применения удобрений (2022 г.): ■ – СЛ, ■ – СЛ ВГГ.

Выводы. СЛ ВГГ характеризуется большей активностью каталазы на всех фонах интенсификации. В слое 0...40 см на интенсивном фоне она была больше, чем в СЛ, на 13 %, во втором гумусовом горизонте – на 23 %, по сравнению с СЛ почвой на глубине 20...40 см. Активность фермента возрастает ко времени репродуктивного периода развития сельскохозяйственных растений.

Инвертазная активность серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом в слое 20...40 см была в среднем на 30 % выше, чем в серой лесной на аналогичной глубине. Самая высокая в опыте активность инвертазы отмечена при использовании средних доз минеральных удобрений и 40 т/га навоза за ротацию 6-польного севооборота в слое 0...20 см – 3,50...3,55 мг глюкозы/г почвы за 4 ч.

Коэффициенты гумусонакопления в вариантах с органоминеральными системами удобрения достигали 0,66...0,72 ед. По всем фонам интенсификации преимуществом в накоплении органического вещества в слое 0...40 см отличались СЛ ВГГ. Содержание гумуса во втором гумусовом горизонте (20...40 см) находилось на уровне пахотного слоя. В серой лесной почве в слое 20...40 см оно было ниже, чем во втором гумусовом горизонте, на 33 %. Лучшее всего органическим веществом была обеспечена почва на интенсивном фоне – в этом варианте в СЛ ВГГ зафиксированное максимальное в опыте содержание гумуса в слое 0...40 см – 4,86 %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет бюджета Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Воронежский федеральный аграрный научный центр». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют результаты исследований человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Якушев А. В., Журавлев А. И., Кузнецова И. Н. Влияние длительной и кратковременных засух на гидрולי-

- ческие ферменты серой почвы // Почвоведение. 2023. № 6. С. 745–757.
2. Сергаченко С. Н., Федорова И. Л., Игнатова Т. Д. Влияние нефтяного загрязнения на активность почвенных ферментов классов оксидоредуктаз и гидролаз // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3 (59). С. 83–88.
3. Дубровина И. А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534.
4. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Ферментативная активность серой лесной почвы при различных приемах основной обработки // Достижения науки и техники АПК. 2021. № 4. С. 17–21.
5. Свойства и функционирование пахотных почв палеокриогенного комплекса Владимирского ополья / Т. А. Архангельская, М. А. Бутылкина, М. А. Мазиров и др. // Почвоведение. 2007. № 3. С. 261–271.
6. Научные и методические основы разработки агротехнологий для адаптивно-ландшафтных систем земледелия на комплексе серых лесных почв Владимирского ополья / А. А. Корчагин, Е. В. Шеин, Л. И. Ильин и др. Иваново: ПресСто, 2018. 216 с.
7. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
8. Чундерова А. И. Активность полифенолоксидазы и пероксидазы в дерново-подзолистых почвах // Почвоведение. 1976. Вып. 7. С. 22–28.
9. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Влияние агротехнической нагрузки на ферментативную активность серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом // Достижения науки и техники АПК. 2018. № 10. С. 63–66.
10. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период / М. А. Азаренко, К. Ш. Казеев, О. Ю. Ермолаева и др. // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1412–1422.
11. Зинченко М. К., Зинченко С. И. Биологическая диагностика экологического состояния серой лесной почвы в условиях интенсивной агрогенной нагрузки // Земледелие. 2023. № 1. С. 14–18.
12. Окорков В. В., Окоркова Л. А., Фенова О. А. Влияние длительного применения удобрений на групповой состав органического вещества серых лесных почв Ополья // Агрохимия. 2017. № 10. С. 3–15.

Поступила в редакцию 10.12.2023

После доработки 25.12.2023

Принята к публикации 09.01.2024