

АГРАРНЫЕ НАУКИ

УДК 631.461.5:631.559:633.22

*Академик В. В. ЛАПА, Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ***ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ
ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ***Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь
brissagro@biz.by; bionfl@yandex.ru*

В сообщении показано, что данные по активности гидролитических и окислительных ферментов можно использовать для биохимической оценки интенсивности минерализации в циклах С и N и гумификации в цикле С и по их соотношению устанавливать наиболее вероятные тренды изменения плодородия дерново-подзолистых почв при разных уровнях применения удобрений.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы, система удобрения, ферментативная активность, минерализация, гумификация.

*V. V. LAPA, N. A. MIHAILOVSKAYA***ENZYME ACTIVITIES OF LUVISOL SOILS UNDER DIFFERENT LEVELS OF FERTILIZATION***Institute for soil science and agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
brissagro@biz.by; bionfl@yandex.ru*

Announcement has shown that the data of hydrolytic and oxidation enzyme activities may be used for biochemical estimation of the intensity of organic substances mineralization in C- and N-cycles and humification in C-cycle in Luvisol soils. The ratio between mineralization and humification intensities indicates more probable trends of soil fertility status changes under different levels of fertilizer application.

Keywords: luvisol soils, fertilizer system, soil enzyme activities, mineralization, humification.

Введение. Экологический менеджмент почвенных ресурсов – одна из глобальных задач современной аграрной науки, тесно связанная с исследованием биологического статуса почв. Для сохранения и поддержания плодородия почв необходима диагностика трендов его изменения при разной интенсивности антропогенной нагрузки. В первую очередь это касается применения удобрений, оказывающих влияние на агрохимические, агрофизические и биологические свойства почв и являющихся значимым фактором регулирования плодородия почв.

Ключевым атрибутом качества и плодородия почвы, несомненно, является содержание органического вещества. Однако этот показатель изменяется медленно и его статистически достоверные изменения регистрируются по истечении довольно длительного периода [1], что затрудняет раннюю диагностику направленности изменения плодородия под действием антропогенных факторов, в том числе удобрений.

Исходя из того, что при выборе индикаторов качества почвы целесообразно базироваться на их связях с органическим веществом почвы [2; 3], для ранней диагностики тенденций изменения плодородия наиболее адекватным критерием является ферментативная активность почв.

Выбор биохимических показателей для диагностики обусловлен их тесной корреляцией с органическим веществом почвы [4], а также тем, что реакция активности ферментов на антропогенную нагрузку отмечается на 1–2 года раньше, по сравнению с содержанием органического

вещества. Это позволяет использовать биохимические показатели для ранней диагностики нежелательных экологических тенденций [5].

Почвенные ферменты играют ключевую роль в процессах формирования плодородия. Биохимические исследования позволяют устанавливать интенсивность ключевых процессов формирования плодородия, так как основу микробного метаболизма составляет работа ферментов, которые катализируют все биохимические реакции и осуществляют круговорот элементов питания в почве [3; 6–8].

Ферментативная активность почвы складывается из активности внеклеточных и внутриклеточных ферментов. Внутриклеточные ферменты ассоциированы с живыми клетками микроорганизмов. Внеклеточные (экстрацеллюлярные или абиотические) ферменты выделяются живыми клетками или поступают в почву после их отмирания, эти ферменты быстро адсорбируются минеральными (глинистыми минералами) и органическими (гуминовыми и нуклеиновыми кислотами, полисахаридами) компонентами почвы [9; 10], аккумулируются в почве, составляя ферментный пул (запас) почвы.

Внеклеточные ферменты составляют значительную часть ферментного пула, каталитические свойства почвы в основном обусловлены действием внеклеточных ферментов микробного происхождения [4; 11]. Стабилизированные за счет прочных связей с минеральными и органическими компонентами почвы, внеклеточные ферменты устойчивы к протеолизу, защищены от инактивации, длительно сохраняют активность и функционируют при неблагоприятных условиях дефицита влаги и элементов питания, когда микробная деятельность обычно угнетена.

Аргументами в пользу ферментативной диагностики являются строгая субстратная специфичность ферментов [3], более высокая стабильность энзиматических параметров [5; 6] и относительная простота измерения по сравнению с другими показателями биологической активности. Методы определения активности ферментов стандартизированы [12; 13], что позволяет получать более сопоставимые данные.

Цель исследований – установить влияние длительного применения удобрений на активность ключевых биохимических процессов в циклах основных биогенных элементов, углерода и азота, в дерново-подзолистых супесчаной и легкосуглинистой почвах и применить показатели ферментативной активности для диагностики трендов изменения плодородия.

Материалы и методы исследований. Биохимические исследования проведены в двух длительных стационарных опытах на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве («Щемяслица», Минский р-н) и на дерново-подзолистой супесчаной почве («Экспериментальная база им. А. В. Суворова», Узденский р-н).

Схема стационарного опыта на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве включала одностороннее применение трех доз азота N_{18} , N_{36} и N_{54} , а также их внесение на двух уровнях фосфорно-калийного питания – $P_{30}K_{66}$ и $P_{60}K_{132}$. В схеме опыта предусмотрены два варианта дробного внесения азотных удобрений – $*N_{54}P_{60}K_{132}$ и $*N_{72}P_{60}K_{132}$. Органические удобрения внесены общим фоном – 8 т/га севооборотной площади. Севооборот зернотравяной: пелюшко-овсяная смесь – озимая тритикале с подсевом клевера – клевер луговой первого г. п. – клевер луговой второго г. п. – яровая пшеница. Схема опыта содержала 17 вариантов удобрений в 4-кратной повторности. Общий размер делянки 69 м² (11,5 × 6 м). Учетная площадь делянки 43 м² (9,55 × 4,5 м).

Схема стационарного опыта на дерново-подзолистой супесчаной почве включала три уровня применения фосфорных и калийных удобрений – $P_{20}K_{40}$, $P_{40}K_{80}$, $P_{70}K_{120}$ и три уровня азотных удобрений – N_{36} , N_{60} и $*N_{84}$ (дробное внесение) на фоне 8 т/га навоза КРС. Севооборот зернотравяной: горохо-овсяная смесь – ячмень – озимая рожь + клевер – клевер – озимая тритикале. Опыт включает 15 вариантов в 4-кратной повторности. Общий размер делянки 45 м² (5 × 9 м), учетная площадь – 32 м² (4 × 8 м). Под горохо-овсяную смесь внесен навоз КРС, 40 т/га.

Ферментативная диагностика почвы в полевых опытах проведена по гидролитическим (инвертаза и уреазы) и окислительным (полифенолоксидаза и пероксидаза) ферментам. Активность ферментов определяли в воздушно-сухих почвенных образцах. Для определения активности инвертазы применяли колориметрический метод Т. А. Щербаковой с использованием сахарозы в качестве ферментного субстрата; для определения количества редуцирующих сахаров, образующихся в результате энзиматической реакции, использована динитросалициловая кислота [14].

Уреазную активность почвы определяли по методу Т. А. Щербаковой, ферментным субстратом служила мочеви́на [12]. Для определения активности почвенных оксидаз, полифенолоксидазы и пероксидазы, использован колориметрический метод Л. А. Карягиной, Н. А. Михайловской с применением гидрохинона в качестве ферментного субстрата, активность ферментов устанавливали по количеству бензохинона, образовавшегося в результате ферментативной реакции [15].

Результаты и их обсуждение. Почвенные ферменты катализируют разнонаправленные процессы, поэтому для объективной характеристики биологического состояния почвы невозможно выбрать один биохимический показатель [1]. В почвах обнаружены представители всех шести известных современной энзимологии классов ферментов, однако наиболее значимую роль играют 2 класса – гидролитические и окислительные ферменты, выполняющие критические функции – минерализацию и гумификацию органических веществ [3].

Гидролитические ферменты обеспечивают ускоренное протекание сложных многостадийных процессов минерализации разнообразных по химическому составу органических соединений и высвобождение элементов питания [11; 17]. Однако по значимости можно выделить ключевые гидролитические ферменты, связанные с разложением наиболее распространенных в почве форм нахождения основных биогенных элементов, углерода и азота.

Преобладающие формы органического углерода в почвах – поли- и олигосахариды [18], их минерализация – самый масштабный деструкционный процесс [3]. В связи с этим интенсивность минерализации в цикле С целесообразно оценивать по гидролитической деградации поли- и олигосахаридов с учетом того, что наиболее объективную оценку интенсивности процесса дает определение активности ферментов завершающих стадий гидролиза, когда в почву непосредственно поступают конечные продукты – моносахариды [16]. Выбор инвертазной активности в качестве диагностического показателя обусловлен ее критической ролью в высвобождении низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы, которые являются основным источником энергии для микроорганизмов.

Известно, что в почвах наиболее широко распространены амидные формы органического азота [18]. В цикле азота универсальным деградационным процессом является аммонификация, в результате которой азот органических соединений становится доступным для растений. На завершающих стадиях аммонификации, обеспечивающих образование аммония, действуют амидогидролазы, к которым относятся уреазы. Активность минерализации в цикле N целесообразно определять по активности уреаз, играющих критическую роль в высвобождении неорганического азота, который непосредственно ассимилируется растениями и микроорганизмами.

Второй по значимости деструкционный процесс в цикле углерода – разложение лигнинов [3]. Наряду с белками, лигнины являются основными поставщиками структурных единиц для гумификации [19]. Одновременно с минерализацией лигнинов растительных остатков протекают биохимические процессы гумификации [3; 8; 20; 21]. По современным представлениям катализаторами гумификации разлагающегося органического вещества считаются микробные оксидазы – фенолоксидазы и пероксидазы, а их активность служит показателем интенсивности процессов гумификации [3; 8; 19; 20; 22; 23]. Эти ферменты – важнейшие составляющие цикла углерода в почве, они катализируют окисление ароматических соединений до хинонов, которые вступают в реакции конденсации с аминокислотами и пептидами с образованием гуминовых кислот [19–21; 23]. Основанием для предложения пероксидаз и полифенолоксидаз в качестве диагностических показателей служит их критическая роль в процессах гумификации, а также их тесная положительная корреляция с содержанием гумуса, преобладающую часть которого составляют инертные гумифицированные вещества [22; 23].

В длительном стационарном опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве проведена ферментативная диагностика по выше перечисленным показателям. Для удобства интерпретации показатели ферментативной активности, выраженные в разных единицах измерения, представлены в относительных величинах (% в скобках) по отношению к контролю (100 %) по методике [24].

По средним данным за 2011–2012 гг. отмечена умеренная активность гидролаз и оксидаз при внесении 8 т/га навоза, применение минеральных удобрений на фоне навоза вызывало более су-

ществленное повышение ферментативной активности. Наиболее интенсивно протекала минерализации в цикле С: при одностороннем внесении возрастающих доз азота $N_{18-36-54}$ инвертазная активность повышена на 19–38 %, при внесении полного минерального удобрения $N_{18-36-54}P_{30}K_{60}$ – на 42–51 %, при удвоении доз фосфора и калия в полном минеральном удобрении $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$ – на 71–104 % по сравнению с контролем. На вариантах с дробным внесением азота, $*N_{54}P_{60}K_{132}$ и $*N_{72}P_{60}K_{132}$, по сравнению с $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$ поддерживался более сберегающий уровень минерализации в цикле С, инвертазная активность была повышена на 50 и 65 % соответственно по отношению к контролю (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Ферментативная активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при разных уровнях применения удобрений («Щемьслица», 2011–2012 гг.)

Вариант	Инвертаза, мг глюкоз/кг (%)	Уреаза, мг $N-NH_4^+$ /кг (%)	Минерализация (%)	ПО	ПФО	Гумификация, %
				мг хинона/кг (%)		
1. Без удобр.	1347 (100)	131 (100)	100	34,1 (100)	33,4 (100)	100
2. Навоз, 8 т/га (фон)	1560 (116)	144 (110)	113	36,9 (108)	35,8 (107)	107
3. N_{18}	1612 (119)	150 (115)	117	37,8 (110)	36,5 (109)	109
4. N_{36}	1777 (132)	154 (119)	125	38,5 (113)	37,4 (112)	112
5. N_{54}	1848 (138)	158 (122)	130	39,8 (116)	39,6 (119)	117
6. $P_{30}K_{66}$	1898 (141)	160 (125)	133	39,5 (115)	42,4 (127)	121
7. $N_{18}P_{30}K_{66}$	1911 (142)	168 (131)	136	41,3 (120)	43,6 (131)	125
8. $N_{36}P_{30}K_{66}$	2014 (150)	178 (139)	144	43,0 (125)	44,0 (132)	128
9. $N_{54}P_{30}K_{66}$	2034 (151)	179 (140)	146	44,4 (129)	45,3 (135)	132
10. $P_{60}K_{132}$	2211(164)	176 (136)	150	45,0 (131)	45,3 (135)	133
11. $N_{18}P_{60}K_{132}$	2303 (171)	190 (148)	159	46,9 (136)	46,6 (139)	137
12. $N_{36}P_{60}K_{132}$	2604 (194)	197 (154)	174	47,8 (140)	48,3 (145)	142
13. $N_{54}P_{60}K_{132}$	2738 (204)	208 (162)	183	48,5 (141)	49,2 (147)	144
14. $*N_{54}P_{60}K_{132}$	2018 (150)	189 (147)	148	45,6 (133)	48,0 (144)	138
15. $*N_{72}P_{60}K_{132}$	2218 (165)	192 (150)	157	46,6 (136)	47,9 (144)	140
НСР ₀₅	222,4	17,4		4,5	2,8	

П р и м е ч а н и я: *N – дробное внесение, ПО – пероксидаза, ПФО – полифенолоксидаза.

Минерализация в цикле N протекала менее интенсивно: на блоке опыта с односторонним внесением азота $N_{18-36-54}$ активность уреазы повышалась на 15–22 %, при внесении полного минерального удобрения $N_{18-36-54}P_{30}K_{60}$ – на 31–40 %, при удвоении доз фосфора и калия $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$ – на 48–62 %. При дробном внесении азота на вариантах $*N_{54}P_{60}K_{132}$ и $*N_{72}P_{60}K_{132}$ отмечен более умеренный, по сравнению с $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$, уровень уреазной активности – 147 % и 150 % соответственно по отношению к контролю (табл. 1).

Внесение органических и минеральных удобрений активизировало процессы гумификации в цикле С: одностороннее внесение азота $N_{18-36-54}$ повышало пероксидазную активность почвы на 10–16 %, полифенолоксидазную – на 9–19 %, за счет полного минерального удобрения $N_{18-36-54}P_{30}K_{60}$ – на 20–29 и 31–35 %, при удвоении доз фосфора и калия в полном минеральном удобрении $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$ – на 36–41 и 39–47 % соответственно. При дробном внесении азота на вариантах $*N_{54}P_{60}K_{132}$ и $*N_{72}P_{60}K_{132}$ активность оксидаз повышена на 33 и 36 % соответственно по отношению к контролю (табл. 1).

Ферментативная диагностика показала, что в целом на вариантах применения удобрений более активно протекали минерализационные процессы. Сравнение усредненных показателей активности гидролитических ферментов (минерализация, %) и окислительных ферментов (гумификация, %) показало, что на вариантах удобрений отмечается превышение минерализации над гумификацией: при одностороннем внесении возрастающих доз азота – на 8–13 %, на вариантах

$N_{18-36-54}P_{30}K_{60}$ – на 11–16 % и на вариантах $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$ – на 22–39 %. Наименьший дисбаланс минерализационных и гумификационных процессов отмечен на двух вариантах с дробным внесением азота по сравнению с $N_{18-36-54}P_{60}K_{132}$: на варианте $*N_{54}P_{60}K_{132}$ минерализация превышала гумификацию на 10 %, на варианте $*N_{72}P_{60}K_{132}$ – на 17 % при более высокой суммарной дозе азота (табл. 1).

Дробное внесение азотных удобрений экологически более приемлемо и позволяет избежать чрезмерного усиления минерализационных процессов в циклах С и N, поддерживая сберегающий уровень минерализации, вполне достаточный для формирования высокой продуктивности зернотравяного севооборота. Наиболее высокая продуктивность зернотравяного севооборота, 126,2 и 124,5 ц к.ед/га, получена на вариантах с дробным внесением азота $N_{54}P_{60}K_{132}$ и $N_{72}P_{60}K_{132}$ при поддержании баланса фосфора и калия в почве. Высокая продуктивность, в пределах 123,8–126,2 ц к.ед/га, получена при внесении N_{18} , N_{36} и N_{54} на фонах $P_{60}K_{132}$, но при этом минерализационные процессы значительно доминировали над гумификационными на 22–39 %. На вариантах $N_{18-36-54}P_{30}K_{66}$ при дефицитном балансе P и K в почве продуктивность была ниже, в пределах 120,1–123,4 ц к.ед/га; минерализация протекала на 11–16 % активнее гумификации. При одностороннем внесении азотных удобрений продуктивность севооборота составила 113,6–116,3, дисбаланс минерализации и гумификации снижался до 8–13 % (табл. 1).

Прослеживается прямая корреляция ферментативной активности с продуктивностью севооборота: R^2 для инвертазы – 0,63, для уреазы – 0,76, для ПО – 0,69, для ПФО – 0,76.

Таким образом, по критериям сберегающего уровня минерализации в циклах С и N, достижения наименьшего дисбаланса активности минерализации и гумификации, высокой продуктивности севооборота на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наиболее обосновано дробное внесение азота N_{54} и N_{72} на фонах $P_{60}K_{132}$.

Аналогичные исследования по определению ферментативной активности и относительных биохимических показателей активности минерализационных и гумификационных процессов были проведены в длительном стационарном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве.

Как и на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, отмечена более активная минерализация органических веществ в цикле углерода и менее интенсивная в цикле азота; на всех вариантах удобрений активность минерализационных процессов превышала гумификацию; установлена тесная корреляция ферментативной активности с продуктивностью севооборота (для инвертазы $R^2 = 0,73$, для уреазы $R^2 = 0,61$, для ПО $R^2 = 0,62$, для ПФО $R^2 = 0,69$).

При увеличении доз фосфорных, калийных ($P_{20}K_{40}$, $P_{40}K_{80}$, $P_{70}K_{120}$) и азотных (N_{36} , N_{60}) удобрений последовательно возрастала активность гидролитических ферментов, инвертазы и уреазы, ответственных за минерализационные процессы, и окислительных ферментов, пероксидазы и полифенолоксидазы, регулирующих гумификацию. Продуктивность зернотравяного севооборота также последовательно повышалась – от 50,4 ц/га к. ед. на контроле, до 64,2–75,0 ц/га к. ед. на вариантах 3–5, до 66,8–77,6 ц/га к. ед. на вариантах 6–8 и до 69,1–79,1 ц/га к. ед. на вариантах 10–12.

В среднем по опыту наибольшая активность минерализации в циклах углерода и азота отмечена на вариантах 10–12 при внесении $P_{70}K_{120}$ и N_{36} , N_{60} на фонах $P_{70}K_{120}$ – 120, 137 и 144 %. На этих же вариантах отмечена и наиболее высокая скорость гумификации – 117, 123 и 128 %. По продуктивности естественно выделяются варианты с внесением полного минерального удобрения – $N_{36}P_{70}K_{120}$ и $N_{60}P_{70}K_{120}$ – 75,7–77,6 ц/га к. ед., однако на этих вариантах наблюдается и наиболее значимое преобладание процессов минерализации, дисбаланс составил 14 и 16 % соответственно. Для сравнения следует отметить, что на двух других блоках опыта дисбаланс минерализации и гумификация на соответствующих вариантах 4, 5 и 7, 8 составил 11 и 11 % и 12 и 10 % (табл. 2).

Сберегающий уровень минерализации в циклах С и N был отмечен при дробном внесении азотных удобрений. По биохимической оценке на варианте $*N_{84}P_{40}K_{80}$ активность минерализации достигала 134 %, гумификации – 126 %, дисбаланс между минерализацией и гумификацией составил 8 %. На втором варианте дробного внесения азота $*N_{84}P_{70}K_{120}$ активность минерализации со-

Т а б л и ц а 2. Ферментативная активность дерново-подзолистой супесчаной почвы при разных уровнях применения удобрений («Э. б. им А. В. Суворова», 2008–2010 гг.)

Вариант	Инвертаза, мг глюкоз/кг (%)	Уреаза, мг N-NH ₄ ⁺ /кг (%)	Минерализация (%)	ПО	ПФО	Гумификация, %
				мг хинона/кг (%)		
1. Без удобр.	1391 (100)	141 (100)	100	35,1 (100)	36,0 (100)	100
2. Навоз, 8 т/га (фон)	1850 (133)	162 (115)	124	41,2 (117)	40,9 (114)	116
3. P ₂₀ K ₄₀	1560 (112)	148 (105)	109	37,2 (106)	37,4 (104)	105
4. N ₃₆ P ₂₀ K ₄₀	1761 (127)	163 (116)	122	38,6 (110)	40,3 (112)	111
5. N ₆₀ P ₂₀ K ₄₀	1860 (134)	169 (120)	127	40,2 (114)	42,3 (118)	116
6. P ₄₀ K ₈₀	1643 (118)	156 (111)	115	39,6 (113)	40,0 (111)	112
7. N ₃₆ P ₄₀ K ₈₀	1899 (137)	164 (116)	127	40,6 (116)	40,8 (113)	115
8. N ₆₀ P ₄₀ K ₈₀	1993 (143)	168 (119)	131	43,7 (125)	41,8 (116)	121
9. *N ₈₄ P ₄₀ K ₈₀	2054 (148)	168 (119)	134	45,3 (129)	44,4 (123)	126
10. P ₇₀ K ₁₂₀	1760 (127)	159 (113)	120	41,0 (117)	42,2 (117)	117
11. N ₃₆ P ₇₀ K ₁₂₀	2053 (148)	176 (125)	137	43,4 (124)	43,4 (121)	123
12. N ₆₀ P ₇₀ K ₁₂₀	2143 (154)	189 (134)	144	45,7 (130)	45,5 (126)	128
13. *N ₈₄ P ₇₀ K ₁₂₀	2018 (145)	180 (128)	137	46,9 (134)	48,8 (136)	135
НСР ₀₅	154,3	14,0		3,07	2,51	

П р и м е ч а н и я: *N – дробное внесение, ПО – пероксидаза, ПФО – полифенолоксидаза.

ставила 137 %, а гумификации – 135 %, дисбаланс между минерализацией и гумификацией – 2 %. Несмотря на то что на обоих вариантах с дробным внесением азота получена практически одинаковая продуктивность севооборота – 81,6 и 81,7 ц/га к. ед., наиболее приемлемым с экологических позиций следует признать вариант *N₈₄P₇₀K₁₂₀, гарантирующий высокую продуктивность при минимальном дисбалансе между минерализацией и гумификацией – 2 % (табл. 2).

Ферментативная диагностика и биохимическая оценка активности протекания процессов минерализации и гумификации позволяет определять уровни нагрузки по удобрениям, поддерживающие сберегающий уровень минерализации органических веществ, равновесие или минимальный дисбаланс минерализации и гумификации во избежание потерь органического вещества и сохранения плодородия почв.

По критериям сберегающего уровня минерализации в циклах С и N, достижения наименьшего дисбаланса интенсивности минерализации и гумификации, высокой продуктивности севооборота на дерново-подзолистой супесчаной почве наиболее обосновано дробное внесение азота – N₈₄P₇₀K₁₂₀ и N₈₄P₄₀K₈₀.

Заключение. Определение активности гидролитических (инвертаза, уреазы) и окислительных (пероксидаза и полифенолоксидаза) ферментов позволяет проводить биохимическую оценку интенсивности минерализационных процессов в циклах С и N и гумификационных в цикле С и по их соотношениям устанавливать наиболее вероятные тренды изменения плодородия почв при разных уровнях применения удобрений.

По данным биохимической оценки для дерново-подзолистых легкосуглинистой и супесчаной почв установлены следующие общие закономерности: более активное протекание минерализационных процессов в цикле углерода по сравнению с циклом азота; последовательное нарастание интенсивности минерализации в циклах С и N и гумификации в цикле С при увеличении доз азотных, фосфорных и калийных удобрений на фоне внесения навоза; повышение продуктивности зернотравяного севооборота; преобладание минерализации над гумификацией на вариантах с удобрениями.

По результатам биохимической оценки на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве дисбаланс активности минерализации и гумификации составил от 6 до 39 %, для дерново-под-

золистой супесчаной почвы – от 2 до 16 % в зависимости от уровня применений минеральных удобрений на фоне навоза.

Минимальный дисбаланс активности минерализации и гумификации, а также высокая и устойчивая продуктивность севооборота достигается при дробном внесении азотных удобрений, которое экологически более приемлемо и позволяет избежать чрезмерного усиления минерализации в циклах С и N, обеспечивая сберегающий уровень минерализации, достаточный для формирования высокой продуктивности. На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве минимальный дисбаланс (10 и 17 %) и наибольшая продуктивность зернотравяного севооборота (126,2 и 124,5 ц к. ед/га) получены на вариантах $N_{54}P_{60}K_{132}$ и $N_{72}P_{60}K_{132}$ с дробным внесением азота и поддержанием баланса фосфора и калия. На дерново-подзолистой супесчаной почве минимальный дисбаланс (2 и 8 %) и наибольшая продуктивность зернотравяного севооборота (81,7 и 81,6 ц к. ед/га) отмечены на вариантах $N_{84}P_{70}K_{120}$ и $N_{84}P_{40}K_{80}$ с дробным внесением азота.

Список использованной литературы

1. *Bandick, A. K.* Field management effects on soil enzyme activities / A. K. Bandick, R. P. Dick // *Soil Biol. Biochem.* – 1999. – Vol. 31. – Iss. 11. – P. 1471–1479.
2. *Masciandaro, G.* Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances / G. Masciandaro, B. Ceccanti // *Soil and Tillage Research.* – 1999. – Vol. 51. – Iss. 1–2. – P. 129–137.
3. *Звягинцев, Д. Г.* Биология почв / Д. Г. Звягинцев, И. Л. Бабьева, Г. М. Зенова. – М.: МГУ, 2005. – 445 с.
4. *Caldwel, B. A.* Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review / B. A. Caldwell // *Pedobiologia.* – 2005. – Vol. 49, Iss. 6. – P. 637–644.
5. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment / M. Vepsalainen [et al.] // *Soil Biol. Biochem.* – 2001. – Vol. 33. – P. 1665–1672.
6. *Dick, R. P.* Soil enzyme activities as indicators of soil quality / R. P. Dick // *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* / eds. J. W. Doran [et al.]. – Madison: Soil Science Society of America, 1994. – P. 107–124.
7. *Dick, R. P.* A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters / R. P. Dick // *Agr. Ecosys. Environ.* – 1992. – N 40. – P. 25–36.
8. *Щербакова, Т. А.* Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т. А. Щербакова. – Минск: Наука и техника, 1983. – 221 с.
9. *Boyd, S. A.* Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes / S. A. Boyd, M. M. Mortland // *Soil Biochemistry.* – New York: Marcel Dekker, 1990. – P. 1–28.
10. *Skujins, J.* History of abiotic soil enzyme research / J. Skujins // *Soil Enzymes* / ed. R. G. Burns. – New York: Academic Press, 1978. – P. 1–49.
11. *Dick, R. P.* Enzymes in the Environment: Activity, Ecology & Applications / R. P. Dick. – Granada, Spain, 1999. – P. 164.
12. *Хазиев, Ф. Х.* Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М.: Наука, 1990. – 189 с.
13. *Галстян, А. Ш.* Ферментативная активность почв Армении / А. Ш. Галстян. – Ереван: Айастан, 1974. – 260 с.
14. *Щербакова, Т. А.* К методике определения активности инвертазы и амилазы в почве / Т. А. Щербакова // Сб. докладов по ферментам почвы. – Минск, 1968. – С. 453–455.
15. *Карагіна, Л. А.* Визначення актиўнасці поліфенолаксідазы і пераксідазы ў глебе / Л. А. Карагіна, Н. А. Міхайлоўская // *Весці АН БССР. Сер. с/г навук.* – 1986. – № 2. – С. 40–41.
16. *Звягинцев, Д. Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей / Д. Г. Звягинцев // *Почвоведение.* – 1978. – № 6. – С. 48–52.
17. *Speir, T. W.* Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery / T. W. Speir, D. J. Ross // *Enzymes in the environments: activity, ecology and applications* / eds. R. G. Burns, R. P. Dick. – 2002. – P. 407–431.
18. *Knicker, H.* Incorporation studies of NH_4^+ during incubation of organic residues by ^{15}N -CPMAS-NMR-spectroscopy / H. Knicker, H. D. Lüdemann, K. Haider // *Eur. J. Soil Sci.* – 1997. – Vol. 48. – P. 431–441.
19. *Александрова, Л. Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л. Н. Александрова. – Л.: Наука, 1980. – С. 122–133.
20. *Sariaslani, F. S.* Microbial enzymes for oxidation of organic molecules / F. S. Sariaslani // *Crit. Rev. Biotechnol.* – 1989. – Vol. 9. – P. 171–257.
21. *Schnitzer, M.* Soil organic matter. The next 75 years / M. Schnitzer // *Soil Sci.* – 1991. – Vol. 151. – P. 41–58.
22. *Kirk, T. K.* Enzymatic “combustion”: the microbial degradation of lignin / T. K. Kirk, R. L. Ferrell // *Annu. Rev. Microbiol.* – 1987. – Vol. 41. – P. 465–505.
23. *Martin, J. P.* Comparison of the use of phenolase and peroxidase for the synthesis of model humic acid type polymers / J. P. Martin, K. A. Haider // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* – 1980. – Vol. 44, N 5. – P. 983–988.
24. *Ацци, Ж.* Сельскохозяйственная экология / Ж. Ацци. – М.: Ил, 1959. – 479 с.

Поступило в редакцию 13.04.2015