

УДК 631.423.3:631.445.24(476)

*В. В. ЛАПА, Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ, С. А. КАСЬЯНЧИК, Е. Г. МЕЗЕНЦЕВА, О. Г. КУЛЕШ,
Т. В. ПОГИРНИЦКАЯ, Т. Б. БАРАШЕНКО*

АКТИВНОСТЬ ГИДРОЛИТИЧЕСКИХ ФЕРМЕНТОВ ЦИКЛОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ВЫСОКО ОКУЛЬТУРЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь, e-mail: bionf1@yandex.ru

На основании определения активности ключевых гидролитических ферментов в циклах С и N (целлюлаза, инвертаза, протеаза и уреазы) получены биохимические показатели минерализации при разных уровнях минерального питания сельскохозяйственных культур на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Приведены биохимические показатели усиления минерализации при внесении 60 т/га солоमистого навоза, его сочетании с $P_{20}K_{45}$ и $P_{40}K_{90}$, а также при внесении возрастающих доз азота (N_{60} и N_{60+30} под зерновые культуры, N_{90} и N_{90+30} под кукурузу) и их сочетании с микроэлементами ($N_{60+30}Cu_{50}+Mn_{50}$ под зерновые культуры и $N_{90+30}Zn_{100}$ под кукурузу) на фонах навоза и его сочетаний с РК-удобрениями. По критериям высокой и устойчивой продуктивности культур и сберегающего уровня минерализации в циклах С и N определены экологически целесообразные варианты нагрузок по удобрениям, обеспечивающие сохранение достигнутого уровня плодородия.

Ключевые слова: гидролитические ферменты С- и N-циклов, биохимические показатели минерализации, высоко окультуренная дерново-подзолистая легкосуглинистая почва.

*V. V. LAPA, N. A. MIKHAILOVSKAYA, S. A. KASYANCHIK, E. G. MEZENTSEVA, O. G. KULESH, T. V. POGIRNITSKAYA,
T. B. BARASHENKO*

ACTIVITIES OF HYDROLYTIC ENZYMES IN CARBON AND NITROGEN CYCLES IN HIGHLY FERTILE LUVISOL SANDY LOAM SOIL UNDER DIFFERENT LEVELS OF MINERAL NUTRITION

The Institute for Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus, e-mail: bionf1@yandex.ru

As a result of determination of activities of hydrolytic enzymes of C and N cycles (cellulase, invertase, protease and urease) biochemical parameters of mineralization have been calculated under different levels of crop fertilization on highly fertile Luvisol sandy loam soil. Biochemical parameters of mineralization increase due to the application of FYM (60 t ha⁻¹), its combination with PK-fertilizer ($P_{20}K_{45}$ and $P_{40}K_{90}$) as well as due to increasing doses of nitrogen (N_{60} and N_{60+30} for cereals, N_{90} and N_{90+30} for maize) and its combination with microelements ($N_{60+30}Cu_{50}+Mn_{50}$ for cereals, $N_{90+30}Zn_{100}$ for maize) are presented. On the basis of the criteria of high and sustainable crop productivity as well as moderate level of mineralization in C and N cycles ecologically reasonable fertilizer treatments which ensure the maintenance of the reached level of fertility have been established.

Keywords: hydrolytic enzymes C and N cycles, biochemical parameters of mineralization, highly fertile Luvisol sandy loam soil.

Введение. В структуре пахотных земель республики значительно возросла доля высоко окультуренных дерново-подзолистых почв [1]. Это актуализирует исследования по изучению их биологического статуса. Биологическая диагностика дает количественную информацию о скорости и направленности трансформации органических веществ, необходимую для контроля и нормирования нагрузки по удобрениям, установления экологически обоснованных систем удобрения с целью поддержания плодородия высоко окультуренных дерново-подзолистых почв [2–5].

При выполнении биологической диагностики особый интерес представляет оценка влияния удобрений на интенсивность процессов минерализации в циклах основных биогенных элементов. Одна из ключевых экологических функций почвы – деградационная [2, 3, 5–9], имеющая основополагающее значение для высвобождения усвояемых элементов питания. Интенсивность минерализационных процессов существенно зависит от уровня антропогенной

нагрузки [3, 7, 8]. Во избежание ускоренной минерализации органического вещества и его непроизводительных потерь необходима оценка биохимических показателей минерализации при разных уровнях минерального питания сельскохозяйственных культур [3, 5, 7, 8].

Исходя из того, что процессы минерализации органических веществ в почве имеют биохимическую природу и катализируются гидролитическими ферментами [2, 3, 5, 9], наиболее целесообразно использовать их активность для характеристики скорости протекания процесса.

Цель исследований – провести количественную оценку активности ключевых деградационных процессов С и N-содержащих органических соединений в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при разных уровнях минерального питания сельскохозяйственных культур.

Объекты и методы исследований. Исследования проведены в полевом опыте на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ОАО «Гастелловское», Минский р-н). Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы: pH_{KCl} 6,2–6,8, содержание подвижных P_2O_5 – 650–750, K_2O – 400–500 мг/кг почвы, гумуса – 2,03–2,57%. Опыт развернут в пространстве в трех полях. Схема опыта содержит 16 вариантов в 4-кратной повторности (схема полевого опыта представлена в таблицах). Общий размер делянки – 36,0 м². Биохимические исследования проведены в звене севооборота: кукуруза – яровая пшеница – яровой ячмень (поля 3 и 4).

В 2014–2015 гг. на поле 3 возделывали яровую пшеницу сорта Василиса и яровой ячмень сорта Стратус, на поле 4 – кукурузу сорта Дельфин и яровую пшеницу сорта Василиса. Дозы удобрений под зерновые культуры: $P_1K_1 - P_{20}K_{45}$; $P_2K_2 - P_{40}K_{90}$; $N_1 - 60$; $N_2 - 60 + 30$; $N_3 - 90 + 30$; микроэлементы (МЭ) – $Cu_{50} + Mn_{50}$; под кукурузу: $P_1K_1 - P_{15}K_{40}$; $P_2K_2 - P_{30}K_{80}$; $N_1 - 90$; $N_2 - 90 + 30$; $N_3 - 120 + 30$; МЭ – Zn_{100} . Некорневую подкормку микроэлементами проводили в фазе одного узла на зерновых культурах и в фазе 6–7 листьев на кукурузе. Органические удобрения (60 т/га солоमистого навоза) вносили под осеннюю вспашку; фосфорные и калийные удобрения (аммонизированный суперфосфат и хлористый калий) – весной под предпосевную культивацию; азотные – в форме карбамида под предпосевную культивацию и в подкормку. Агротехника возделывания зерновых культур и кукурузы – общепринятая для Республики Беларусь.

Подготовка почвы для биохимических анализов включала: высушивание, просеивание, отбор корешков. В образцах почвы определяли активность гидролитических ферментов: целлюлазы, инвертазы, протеазы и уреазы.

Для определения активности инвертазы использовали колориметрический метод Т. А. Щербаковой [4, 10], в котором ферментным субстратом является сахароза, для индикации редуцирующих сахаров используется 3,5-динитросалициловая кислота, активность фермента рассчитывается в мг глюкозы/кг почвы. Для установления активности почвенной уреазы применяли колориметрический метод Т. А. Щербаковой [4, 10], где в качестве ферментного субстрата используется мочеви́на, активность фермента рассчитывается в мг $N-NH_4^+$ /кг почвы. Протеолитическую активность почвы определяли по методу А. Ш. Галстяна с применением желатина в качестве ферментного субстрата, активность рассчитывали по продукту ферментативной реакции – в мг глицина /кг почвы [10].

Целлюлозолитическую активность высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы определяли аппликационным методом по разложению целлюлозного материала (фильтровальной бумаги), помещенного в почву [10]. Для этого на вариантах полевого опыта был заложен модельный эксперимент, экспозиция целлюлозного материала в почве составила 43 сут. После извлечения образцов из почвы, последовательной их обработки растворами HCl , Na_2CO_3 , водой и доведения до постоянного веса проводили расчет активности минерализации по убыли массы целлюлозы (г или %).

Результаты и их обсуждение. Ферменты, биокатализаторы белковой природы, являются важнейшими клеточными метаболитами, характеризующимися высокой активностью и специфичным воздействием на субстрат. За счет действия ферментов реализуется генетическая информация, осуществляются клеточные метаболические процессы. В ходе биохимических ре-

акций ферменты не претерпевают химических изменений, не входят в состав их конечных продуктов, не смещают положение равновесия реакции, значительно ускоряя его достижение.

В зависимости от типа катализируемой реакции ферменты подразделяют на 6 классов: гидролазы, оксидоредуктазы, трансферазы, лиазы, изомеразы и лигазы. Каждый класс делится на подклассы в соответствии с природой функциональных групп ферментных субстратов. В почвах важнейшую роль играют гидролитические ферменты. Они выполняют ключевую экологическую функцию почвы – разложение, или минерализацию, сложных по химическому составу органических соединений до усвояемых форм. Важнейшие конститутивные ферменты микроорганизмов – гидролитические, так как это является основным условием их выживания. В настоящее время известно около 200 гидролаз, которые подразделяются на подклассы по типу гидролизуемой связи. Механизм действия гидролитических ферментов заключается в присоединении элементов воды. Под влиянием гидролаз сложные органические вещества, присоединяя воду, распадаются на более простые составные части, т. е. подвергаются гидролизу.

Как правило, гидролитические ферменты имеют внеклеточный компонент. Ферментативная активность почвы складывается из активности внеклеточных и внутриклеточных ферментов. Внутриклеточные ферменты связаны с живыми микробными клетками. Внеклеточные ферменты выделяются живыми микробными клетками или поступают в почву после их отмирания. В соответствии с исследованиями М. А. Tabatabai [9], А. D. MacLaren [11], J. Skujins [12], S. A. Boyd, [13], эти ферменты адсорбируются минеральными и органическими компонентами почвы, они стабилизируются, накапливаются в почве, создавая значительный ферментный запас. Эти стабилизированные внеклеточные ферменты устойчивы к протеолитическому воздействию, защищены от инактивации и длительное время сохраняют активность.

При оценке активности процессов минерализации в почве целесообразно учитывать самые масштабные деградационные процессы в циклах основных биогенных элементов. Прежде всего, следует оценить минерализацию в циклах углерода и азота, что и входило в задачи исследований.

Как известно, преобладающие формы нахождения органического углерода в почве – полисахариды и олигосахариды [14]. Наиболее масштабные и универсальные деструкционные процессы в цикле углерода почвы – это разложение целлюлозы и сахарозы. В связи с этим интенсивность процессов минерализации в цикле С наиболее объективно оценивать по целлюлозолитической и инвертазной активности.

Ферментативное разложение целлюлозы и родственных ей полисахаридов – сложный процесс, требующий участия комплекса ферментов. Наиболее удобно использование аппликационных методов, учитывающих убыль массы помещенных в почву целлюлозных материалов [10].

По данным модельного эксперимента с закладкой целлюлозного материала (фильтровальной бумаги) в почву установлены актуальные параметры минерализации целлюлозы при разных уровнях минерального питания яровой пшеницы сорта Василиса. В почве без удобрений скорость минерализации целлюлозы составила 0,18 г (100 %). На фоне 1 за счет последствия 60 т/га солоमистого навоза отмечена существенная активизация разложения целлюлозы – до 0,33 г (183 %). Внесение азота N_{60} повысило активность до 0,37 г (205 %). При дробном внесении более высокой дозы азота N_{60+30} минерализация целлюлозы усилилась до 0,39 г (217 %). Внесение микроэлементов $Cu_{50} + Mn_{50}$ в сочетании с N_{60+30} стимулировало минерализацию до 0,40 г (222 %), а в сочетании с N_{90+30} снижало активность гидролиза до 0,33 г (183 %) (табл. 1). На фонах 2 и 3 наблюдали аналогичные зависимости.

Наиболее значимую стимуляцию разложения целлюлозы в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве обеспечивало внесение навоза и его сочетаний с $P_{20}K_{45}$ и $P_{40}K_{90}$. По сравнению с действием навоза влияние азотных удобрений N_{60} и N_{60+30} , а также микроэлементов $Cu_{50} + Mn_{50}$ менее существенно. Внесение $N_{90+30} + Cu_{50} + Mn_{50}$ приводило к замедлению разложения целлюлозы в почве.

Т а б л и ц а 1. Интенсивность разложения целлюлозы в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при разных уровнях минерального питания яровой пшеницы (поле 3), 2014 г.

Вариант опыта	Масса фильтровальной бумаги, г		Убыль массы	
	начальная	конечная	г	%
<i>Кукуруза</i>				
Без удобрений	1,74	1,56	0,18	100
П/д навоза, 60 т/га – фон 1	1,73	1,40	0,33	183
Фон 1 + N ₆₀	1,76	1,39	0,37	205
Фон 1 + N ₆₀₊₃₀	1,73	1,34	0,39	217
Фон 1 + N ₆₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,75	1,35	0,40	222
Фон 1 + N ₉₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,74	1,41	0,33	183
<i>Яровая пшеница</i>				
П/д навоза, 60 т/га, P ₂₀ K ₄₅ – фон 2	1,71	1,37	0,34	189
Фон 2 + N ₆₀	1,72	1,34	0,38	211
Фон 2 + N ₆₀₊₃₀	1,70	1,30	0,40	222
Фон 2 + N ₆₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,72	1,32	0,40	222
Фон 2 + N ₉₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,74	1,43	0,31	172
<i>Яровой ячмень</i>				
П/д навоза, 60 т/га, P ₄₀ K ₉₀ – фон 3	1,78	1,36	0,42	233
Фон 3 + N ₆₀	1,65	1,21	0,44	244
Фон 3 + N ₆₀₊₃₀	1,74	1,29	0,45	250
Фон 3 + N ₆₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,75	1,28	0,47	261
Фон 3 + N ₉₀₊₃₀ + Cu ₅₀ + Mn ₅₀	1,72	1,34	0,38	211
НСР ₀₅			0,06	

Гидролитическая минерализация олигосахаридов, связанная с деятельностью инвертаз, также широко распространена в почве. Определена активность инвертаз, характеризующая скорость процессов гидролиза сахарозы при разных уровнях минерального питания сельскохозяйственных культур. На обоих полях опыта на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве отмечены близкие по величине показатели минерализации сахарозы. Внесение 60 т/га навоза стимулировало минерализацию, которая составила в среднем за 2 года исследований 2,6 и 2,62 г глюкозы/кг почвы (100 %), при внесении навоза в сочетании с P₁K₁ – 2,84 (109 %) и 2,83 (108 %) г глюкозы/кг, в сочетании с P₂K₂ – 3,01 (116 %) и 3,00 (115 %) г глюкозы/кг почвы по сравнению с контролем (табл. 2).

На фоне 1 внесение азота в дозе N₁ также стимулировало минерализацию сахарозы: 2,84 (109 %) г глюкозы/кг на третьем поле и 2,92 (112 %) г глюкозы/кг почвы – на четвертом; при внесении азота в дозе N₂ – 2,88 (111 %) и 2,96 (113 %) г глюкозы/кг соответственно. Аналогичные зависимости были установлены на фонах 2 и 3.

Применение микроэлементов в сочетании с дозой азота N₂ не снижало скорости минерализации олигосахаридов, а в сочетании с N₃ вызывало тенденцию снижения активности по сравнению с вариантом N₂ + МЭ на всех изученных фонах (см. табл. 2).

При возделывании яровой пшеницы, ярового ячменя и кукурузы на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве установлены сравнимые по величине показатели минерализации олигосахаридов и сходные зависимости активности инвертазы от уровня минерального питания. По мере увеличения нагрузки по удобрениям отмечено усиление минерализации в цикле углерода. Наибольшая активность минерализации олигосахаридов отмечена на вариантах фона 3 (навоз, 60 т/га + P₂K₂).

В цикле азота почвы универсальным и наиболее значимым деградационным процессом является аммонификация, в результате которой органический азот переходит в доступные для растений минеральные формы. На разных ступенях аммонификации действуют специфические

Т а б л и ц а 2. Активность минерализации олигосахаридов в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, 2014–2015 гг.

Вариант опыта	Минерализация олигосахаридов			
	г глюкозы / кг почвы		%	
	Поле 3	Поле 4	Поле 3	Поле 4
<i>Кукуруза</i>				
Контроль б/у	2,60	2,62	100	100
Навоз, 60 т/га – фон 1	2,77	2,83	106	108
Фон 1 + N ₁	2,84	2,92	109	112
Фон 1 + N ₂	2,88	2,96	111	113
Фон 1 + N ₂ + МЭ	3,00	3,17	115	121
Фон 1 + N ₃ + МЭ	2,83	3,00	109	115
<i>Яровая пшеница</i>				
Навоз, 60 т/га + P ₁ K ₁ – фон 2	2,84	2,83	109	108
Фон 2 + N ₁	3,03	3,09	116	118
Фон 2 + N ₂	3,07	3,08	118	117
Фон 2 + N ₂ + МЭ	3,21	3,19	123	122
Фон 2 + N ₃ + МЭ	3,05	3,05	117	116
<i>Яровой ячмень</i>				
Навоз, 60 т/га + P ₂ K ₂ – фон 3	3,01	3,00	116	115
Фон 3 + N ₁	3,11	3,23	119	123
Фон 3 + N ₂	3,26	3,29	125	126
Фон 3 + N ₂ + МЭ	3,40	3,38	130	129
Фон 3 + N ₃ + МЭ	3,28	3,15	126	120
НСР ₀₅	0,20	0,12		

П р и м е ч а н и е. Под яровую пшеницу и яровой ячмень: P₁K₁ – P₂₀K₄₅; P₂K₂ – P₄₀K₉₀; N₁ – 60; N₂ – 60 + 30; N₃ – 90 + 30; МЭ – Cu₅₀ + Mn₅₀; под кукурузу: P₁K₁ – P₁₅K₄₀; P₂K₂ – P₃₀K₈₀; N₁ – 90; N₂ – 90 + 30; N₃ – 120 + 30; МЭ – Zn₁₀₀.

группы гидролитических ферментов – протеазы, пептидазы, дезаминазы и амидогидролазы, определяющие динамику азота в почве [14]. На начальных стадиях аммонификации действуют протеолитические ферменты. Основной реакцией, катализируемой протеолитическими ферментами, является гидролиз пептидной связи в молекулах белков и пептидов. На завершающих стадиях, обеспечивающих образование аммония, действуют амидогидролазы, к которым относится уреазы. В связи с этим показатели минерализации азотсодержащих органических соединений почвы наиболее целесообразно оценивать по протеолитической и уреазной активности [5].

Установлены параметры минерализации белковых соединений до аминокислот. При возделывании зерновых культур (поле 3) под влиянием 60 т/га навоза активность минерализации составила 64 мг глицина/кг почвы, при сочетании навоза с P₂₀K₄₅ – 67 мг глицина/кг почвы, с P₄₀K₉₀ – 74 мг глицина/кг. На фоне 1 внесение N₆₀ усиливало протеолиз до 76 мг глицина/кг, N₆₀₊₃₀ – до 83, на фоне 2 – до 87 и 93 мг глицина/кг почвы, на фоне 3 – до 90 и 106 мг глицина/кг почвы соответственно при активности протеолиза на контроле без удобрений 50 мг глицина/кг почвы. На вариантах N₆₀₊₃₀ с микроэлементами Cu₅₀ + Mn₅₀ отмечено дальнейшее усиление протеолитической активности: на фоне 1 – до 96 мг глицина/кг, на фоне 2 – до 101 мг глицина/кг, на фоне 3 – до 118 мг глицина/кг (табл. 3). На посевах кукурузы и яровой пшеницы (поле 4) отмечены сходные зависимости минерализации белковых соединений от уровня минерального питания.

Таким образом, минерализация в цикле азота последовательно усиливается с увеличением нагрузки по удобрениям – при внесении навоза и далее при его сочетании с минеральными удобрениями, при увеличении доз азота. Тенденция ингибирования протеолитической активности отмечена на последнем варианте фона 3 – N₉₀₊₃₀ + МЭ.

Т а б л и ц а 3. Протеолитическая активность высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, 2014–2015 гг.

Вариант опыта	Минерализация белков			
	мг глицина / кг почвы		%	
	Поле 3	Поле 4	Поле 3	Поле 4
<i>Кукуруза</i>				
Без удобрений	50	65	100	100
Навоз, 60 т/га – фон 1	64	79	128	121
Фон 1 + N ₆₀	76	83	152	128
Фон 1 + N ₆₀₊₃₀	83	79	166	121
Фон 1 + N ₆₀₊₃₀ + МЭ	96	83	192	128
Фон 1 + N ₉₀₊₃₀ + МЭ	90	75	180	115
<i>Яровая пшеница</i>				
Навоз, 60 т/га P ₂₀ K ₄₅ – фон 2	67	79	134	121
Фон 2 + N ₆₀	87	85	174	131
Фон 2 + N ₆₀₊₃₀	93	90	186	138
Фон 2 + N ₆₀₊₃₀ + МЭ	101	98	202	151
Фон 2 + N ₆₀₊₃₀ + МЭ	95	85	190	131
<i>Яровой ячмень</i>				
Навоз, 60 т/га P ₄₀ K ₉₀ – фон 3	74	92	148	141
Фон 3 + N ₆₀	90	103	180	158
Фон 3 + N ₆₀₊₃₀	106	114	212	175
Фон 3 + N ₆₀₊₃₀ + МЭ	118	122	236	188
Фон 3 + N ₉₀₊₃₀ + МЭ	109	113	218	174
HCP ₀₅	8,6	9,1		

П р и м е ч а н и е. Под яровую пшеницу и яровой ячмень: P₁K₁ – P₂₀K₄₅; P₂K₂ – P₄₀K₉₀; N₁ – 60; N₂ – 60 + 30; N₃ – 90 + 30; МЭ – Cu₅₀ + Mn₅₀; под кукурузу: P₁K₁ – P₁₅K₄₀; P₂K₂ – P₃₀K₈₀; N₁ – 90; N₂ – 90 + 30; N₃ – 120 + 30; МЭ – Zn₁₀₀.

Установлены параметры минерализации мочевины с выделением аммония. При внесении 60 т/га соломистого навоза активность минерализации составила 194–199 мг N-NH₄⁺/кг почвы (109–113 %), при сочетании навоза с P₂₀K₄₅ – 192–200 мг N-NH₄⁺/ кг почвы (109–112 %), с P₄₀K₉₀ – 216–224 мг N-NH₄⁺/ кг почвы (118–130 %). На фоне 1 внесение N₁, N₂ и N₂ + МЭ усиливало гидролиз до 201–222 мг N-NH₄⁺/ кг (113–129 %), на фоне 2 – до 209–238 мг N-NH₄⁺/ кг почвы (116–131 %), на фоне 3 – до 231–257 мг N-NH₄⁺/ кг почвы (126–149 %) соответственно по сравнению с контролем. На вариантах N₃ с микроэлементами отмечена тенденция снижения активности минерализации мочевины (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Уреазная активность высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, 2014–2015 гг.

Вариант опыта	Минерализация мочевины			
	мг N-NH ₄ ⁺ / кг почвы		%	
	Поле 3	Поле 4	Поле 3	Поле 4
<i>Кукуруза</i>				
Контроль б/у	172	183	100	100
Навоз, 60 т/га – фон 1	194	199	113	109
Фон 1 + N ₁	201	206	117	113
Фон 1 + N ₂	210	213	122	116
Фон 1 + N ₂ + МЭ	222	221	129	121
Фон 1 + N ₃ + МЭ	205	222	119	121

Вариант опыта	Минерализация мочевины			
	мг N-NH ₄ ⁺ / кг почвы		%	
	Поле 3	Поле 4	Поле 3	Поле 4
<i>Яровая пшеница</i>				
Навоз, 60 т/га + P ₁ K ₁ – фон 2	192	200	112	109
Фон 2 + N ₁	209	213	122	116
Фон 2 + N ₂	225	219	131	120
Фон 2 + N ₂ + МЭ	221	238	128	130
Фон 2 + N ₃ + МЭ	209	223	122	122
<i>Яровой ячмень</i>				
Навоз, 60 т/га + P ₂ K ₂ – фон 3	224	216	130	118
Фон 3 + N ₁	232	231	135	126
Фон 3 + N ₂	243	232	141	127
Фон 3 + N ₂ + МЭ	257	231	149	126
Фон 3 + N ₃ + МЭ	244	226	142	123
НСР ₀₅	16,7	19,1		

Примечание. Под яровую пшеницу и яровой ячмень: P₁K₁ – P₂₀K₄₅; P₂K₂ – P₄₀K₉₀; N₁ – 60; N₂ – 60 + 30; N₃ – 90 + 30; МЭ – Cu₅₀ + Mn₅₀; под кукурузу: P₁K₁ – P₁₅K₄₀; P₂K₂ – P₃₀K₈₀; N₁ – 90; N₂ – 90 + 30; N₃ – 120 + 30; МЭ – Zn₁₀₀.

По данным ферментативной диагностики получены усредненные биохимические показатели минерализации в циклах С и N по двум полям полевого опыта (табл. 5). Установлено, что внесение 60 т/га солоमистого навоза и его сочетание с фосфорно-калийными удобрениями были факторами усиления минерализации углерод- и азотсодержащих органических соединений в почве – 114, 115 и 128 % от фона 1 к фонам 2 и 3 соответственно по сравнению с контролем (100 %). Следует отметить, что при внесении навоза, а также при его сочетании с минимальной в опыте дозой P₁K₁ наблюдали умеренное повышение активности минерализации – на 14 и 15 %, а при сочетании навоза с удвоенной дозой фосфорно-калийных удобрений, (P₂K₂), активность минерализации возросла на 28 %, т. е. практически в 2 раза по сравнению с контролем.

На фонах навоза и его сочетаний с P₁K₁ и P₂K₂ фактором усиления минерализационных процессов было внесение возрастающих доз азотных удобрений (N₆₀ и N₆₀₊₃₀ под зерновые культуры, N₉₀ и N₉₀₊₃₀ под кукурузу), а также сочетание азота с микроэлементами (N₆₀₊₃₀Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые культуры и N₉₀₊₃₀Zn₁₀₀ под кукурузу). По биохимическим показателям усиление минерализации под влиянием азотных удобрений составило: на фоне 1 – 22–34 %, фоне 2 – 29–42 %, фоне 3 – 40–60 %.

По данным двухлетних исследований сочетание N₉₀₊₃₀Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые культуры и N₁₂₀₊₃₀Zn₁₀₀ под кукурузу на фонах 1, 2, 3 вызывало тенденцию замедления процессов минерализации в циклах С и N на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Выяснение этого вопроса требует продолжения исследований и накопления экспериментальных данных по активности гидролитических ферментов.

Проведено сравнение показателей минерализации в циклах углерода и азота с продуктивностью сельскохозяйственных культур за 2013–2015 гг. По данным корреляционно-регрессионного анализа теснота связи активности гидролитических ферментов со среднегодовой продуктивностью культур характеризовалась коэффициентом детерминации R² = 0,69.

Сравнительный анализ показал, что дробное внесение N₃ + МЭ (N₉₀₊₃₀Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые культуры и N₁₂₀₊₃₀Zn₁₀₀ под кукурузу) на фоне внесения 60 т/га соломистого навоза позволило повысить среднегодовую продуктивность сельскохозяйственных культур до 114,6 ц/га к. ед. по сравнению с вариантами N₂ и N₂ + МЭ и снизить активность минерализации со 134 до 126 %. Это позволяет рассматривать вариант N₃ + МЭ фона 1 как один из наиболее приемлемых с экологической точки зрения (см. табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Активность гидролитических ферментов циклов С и N в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве

Вариант опыта	Активность минерализации, %	Среднегодовая продуктивность, ц/га к. ед., 2013–2015 гг.
<i>Кукуруза</i>		
Контроль б/у	100	
Навоз, 60 т/га – фон 1	114	93,1
Фон 1 + N ₁	122	102,6
Фон 1 + N ₂	125	109,4
Фон 1 + N ₂ + МЭ	134	109,3
Фон 1 + N ₃ + МЭ	126	114,6
<i>Яровая пшеница</i>		
Навоз, 60 т/га + P ₁ K ₁ – фон 2	115	94,1
Фон 2 + N ₁	129	105,6
Фон 2 + N ₂	135	112,4
Фон 2 + N ₂ + МЭ	142	112,3
Фон 2 + N ₃ + МЭ	133	117,1
<i>Яровой ячмень</i>		
Навоз, 60 т/га + P ₂ K ₂ – фон 3	128	95,4
Фон 3 + N ₁	140	106,6
Фон 3 + N ₂	151	112,2
Фон 3 + N ₂ + МЭ	160	113,3
Фон 3 + N ₃ + МЭ	150	116,4
		НСР ₀₅ , 5,0

П р и м е ч а н и е. Под яровую пшеницу и яровой ячмень: P₁K₁ – P₂₀K₄₅; P₂K₂ – P₄₀K₉₀; N₁ – 60; N₂ – 60 + 30; N₃ – 90 + 30; МЭ – Cu₅₀ + Mn₅₀; под кукурузу: P₁K₁ – P₁₅K₄₀; P₂K₂ – P₃₀K₈₀; N₁ – 90; N₂ – 90 + 30; N₃ – 120 + 30; МЭ – Zn₁₀₀.

Сочетание 60 т/га навоза с фосфорно-калийными удобрениями в дозах P₁K₁ (фон 2) повышало продуктивность сельскохозяйственных культур по сравнению с фоном 1, где фосфорно-калийные удобрения не вносили. При двукратном увеличении доз фосфора и калия до P₂K₂ на фоне 60 т/га навоза (фон 3) существенного повышения продуктивности зерновых культур и кукурузы по сравнению с фоном 2 не отмечено, наблюдалось усиление активности минерализационных процессов в циклах С и N по сравнению с фоном 2 (см. табл. 5).

В качестве основных критериев оценки экологически обоснованного уровня нагрузки по удобрениям целесообразно использовать такие показатели, как высокая и устойчивая продуктивность сельскохозяйственных культур при сберегающем уровне минерализации органических веществ в циклах углерода и азота [5]. В полевом эксперименте на высоко окультуренной почве на фоне 1 этим условиям удовлетворяет вариант N₃ + МЭ (N₉₀₊₃₀ Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые культуры и N₁₂₀₊₃₀ Zn₁₀₀ под кукурузу), обеспечивающий среднегодовую продуктивность 114,6 и активность минерализации – 126 %. На фоне 2 экологически наиболее обоснованы варианты с дробным внесением N₂ и внесение азота в сочетании с микроэлементами – N₂ + МЭ (N₆₀₊₃₀ + Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые и N₉₀₊₃₀ + Zn₁₀₀ под кукурузу) и N₃ + МЭ (N₉₀₊₃₀ + Cu₅₀ + Mn₅₀ под зерновые и N₁₂₀₊₃₀ + Zn₁₀₀ под кукурузу), которые обеспечивают среднегодовую продуктивность 112,4, 112,3 и 117,1 ц/га к. ед. и активность минерализации – 135, 142 и 133 %. Следует отметить, что с точки зрения снижения затрат на азотные удобрения на фоне 2 более приемлемы варианты N₂ и N₂ + МЭ, однако при этом отмечены более высокие показатели минерализации – 135 и 142 %.

Принимая во внимание урожайные данные и биохимические показатели минерализации в циклах С и N, нагрузку по удобрениям, исследованную на фоне 3, можно рассматривать как избыточную для высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, вызывающую неблагоприятное усиление минерализации и не сопровождающуюся существенным

повышением продуктивности сельскохозяйственных культур. Такой уровень нагрузки может вызывать непроизводительные потери органического вещества и снижение достигнутого уровня плодородия почвы.

Заключение. На основании изучения активности ключевых гидролитических процессов в циклах углерода и азота получены биохимические параметры минерализации органических веществ при разных уровнях минерального питания яровой пшеницы, ярового ячменя и кукурузы на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Установлено, что внесение 60 т/га соломистого навоза и его сочетание с фосфорно-калийными удобрениями (P_1K_1 и P_2K_2) усиливают минерализацию в почве – на 14, 15 и 28 % по сравнению с контролем (100 %). На фонах навоза и его сочетаний с РК-удобрениями значимым фактором усиления минерализации являются возрастающие дозы азотных удобрений (N_{60} и N_{60+30} под зерновые культуры, N_{90} и N_{90+30} под кукурузу), а также их сочетание с микроэлементами ($N_{60+30}Cu_{50} + Mn_{50}$ под зерновые культуры и $N_{90+30}Zn_{100}$ под кукурузу): на фоне 1 – на 22–34 %, на фоне 2 – на 29–42 % и на фоне 3 – на 40–60 %.

По критериям высокой и устойчивой продуктивности сельскохозяйственных культур и сберегающего уровня минерализации в циклах C и N в условиях высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы экологически наиболее целесообразно применение: на фоне 1 (60 т/га навоза) варианта с дробным внесением азота в сочетании с микроэлементами $N_3 + MЭ$ ($N_{90+30}Cu_{50} + Mn_{50}$ под зерновые культуры и $N_{120+30}Zn_{100}$ под кукурузу), обеспечивающего среднегодовую продуктивность 114,6 ц/га к. ед. и активность минерализации – 126 %; на фоне 2 (60 т/га навоза + P_1K_1) – вариантов N_2 и $N_2 + MЭ$ (N_{60+30} и $N_{60+30} + Cu_{50} + Mn_{50}$ под зерновые и N_{90+30} и $N_{90+30} + Zn_{100}$ под кукурузу) и $N_3 + MЭ$, обеспечивающих среднегодовую продуктивность 112,4, 112,3 и 117,1 ц/га к. ед. и активность минерализации – 135, 142 и 133 % соответственно.

Список использованных источников

1. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2007–2010) / под общ. ред. И. М. Богдевича. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2012. – 276 с.
2. Звягинцев, Д. Г. Биология почв / Д. Г. Звягинцев, И. Л. Бабьева, Г. М. Зенова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 445 с.
3. Микроорганизмы и охрана почв / под ред. Д. Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 с.
4. Щербакова, Т. А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т. А. Щербакова. – Минск: Наука и техника, 1983. – 221 с.
5. Биохимические и микробиологические критерии оценки плодородия почв и нормирования антропогенной нагрузки: метод. рекомендации / В. В. Лапа [и др.]. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2015. – 40 с.
6. Schnitzer, M. Soil organic matter. The next 75 years / M. Schnitzer // Soil Sci. – 1991. – Vol. 151. – P. 41–58.
7. Bandick, A. K. Field management effects on soil enzyme activities / A. K. Bandick, R. P. Dick // Soil Biol. Biochem. – 1999. – Vol. 31, Is. 11. – P. 1471–1479.
8. Caldwell, B. A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review / B. A. Caldwell // Pedobiologia. – 2005. – Vol. 49. – P. 637–644.
9. Tabatabai, M. A. Soil enzymes / M. A. Tabatabai // Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties / eds. R. W. Weaver [et al.]. – Soil Science Society of America, Madison, 1994. – P. 775–833.
10. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М.: Наука, 2005. – 252 с.
11. McLaren, A. D. Soil as a system of humus and clay immobilized enzymes / A. D. McLaren // Chemica Scripta. – 1975. – Vol. 8. – P. 97–99.
12. Skujins, J. History of abiotic soil enzyme research / J. Skujins // Soil Enzymes / ed. R. G. Burns. – Academic Press, New York, 1978. – P. 1–49.
13. 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.
14. 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.

Поступила в редакцию 28.03.2016