

УДК 631.461:631.445.2

*Академик В. В. ЛАПА, Н. А. МИХАЙЛОВСКАЯ***АКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И ГУМИФИКАЦИИ  
В ВЫСОКО ОКУЛЬТУРЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ  
ПОЧВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ***Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь  
brissagro@biz.by; bionf1@yandex.ru*

На основании анализа активности целлюлозолитического и амилолитического микробных сообществ и результатов диагностики по гидролитическим и окислительным ферментам установлены изменения биохимических показателей минерализации и гумификации органических веществ в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при ресурсосберегающих системах удобрения. Показано, что для сохранения плодородия почвы экологически наиболее целесообразно внесение полного минерального удобрения,  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$ , что обеспечивает высокую и устойчивую урожайность при сберегающем уровне минерализации органического вещества в циклах углерода и азота.

*Ключевые слова:* дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, гидролитические и окислительные ферменты, минерализация в циклах С и N, гумификация в цикле С.

*V. V. LAPA, N. A. MICHAILOVSKAYA***ACTIVITY OF MINERALIZATION AND HUMIFICATION PROCESSES IN HIGH-FERTILITY  
DERNO-PODZOLIC SANDY-LOAM SOIL DEPENDING ON THE FERTILIZER APPLICATION***Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
brissagro@biz.by; bionf1@yandex.ru*

The changes of biochemical indices of mineralization and humification of organic substances in high-fertility derno-podzolic sandy-loam soil depending on the application of different fertilizer systems were established using the data on the activity of cellulolytic and amylolytic microbial communities, as well as the results of enzymatic soil diagnostics (hydrolytic and oxidative enzymes). The application of  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$  was shown to provide high and sustainable crop yields under a moderate level of organic substances mineralization in C and N-circles.

*Keywords:* derno-podzolic loamy soil hydrolytic and oxidative enzymes, mineralization in the C and N cycles, humification in the cycle C.

**Введение.** В результате эффективного применения удобрений и мелиорантов существенно увеличилась доля высоко окультуренных дерново-подзолистых почв в структуре пахотных земель Беларуси [1]. В настоящее время доля пахотных почв с высокой обеспеченностью подвижным фосфором (более 250 мг/кг  $P_2O_5$ ) составляет 26,6 %, калием (более 300 мг/кг  $K_2O$ ) – 16,2 % при средневзвешенном содержании  $P_2O_5$  в пахотных почвах – 194 мг/кг,  $K_2O$  – 214 мг/кг почвы, гумуса – 2,24 %. Такие почвы представляют собой мало исследованные объекты как в агрохимическом, так и в биологическом отношении [1]. Для сохранения достигнутого уровня плодородия необходима ранняя диагностика трендов его изменения при разной интенсивности антропогенной нагрузки. Эта приоритетная экологическая задача предполагает, прежде всего, оценку влияния систем удобрения, применяемых на высоко окультуренных дерново-подзолистых почвах, на скорость и направленность трансформации органического вещества. Несбалансированное применение удобрений, особенно азотных и азотно-калийных, может вызывать ускоренную минерализацию и непроизводительные потери органического вещества, повышать газообразные потери азота вследствие нитрификации и денитрификации [2–6].

© Лапа В. В., Михайловская Н. А., 2016.

Надежными оценочными критериями скорости и направленности трансформации органического вещества являются биологические показатели [3; 5–7], которые тесно коррелируют с органическим веществом почвы [8; 9] и позволяют на ранних стадиях выявлять негативные экологические тенденции [10].

При экологической оценке систем удобрения одним из наиболее значимых биологических критериев считается напряженность минерализации основных форм нахождения органического углерода в почвах, поли- и олигосахаридов, за счет деятельности целлюлозолитического и амилитического микробных сообществ. Определение интенсивности минерализационных процессов – необходимый компонент экологической оценки систем удобрения, позволяющий выявить оптимальную нагрузку по удобрениям и обеспечить берегающий уровень минерализации в цикле углерода.

Для всесторонней оценки направленности трансформации органического вещества под влиянием систем удобрения целесообразна также дополнительная биохимическая оценка, основанная на сравнении активности минерализационных и гумификационных процессов по предложенной нами методике [7].

Цель исследований – количественная характеристика интенсивности процессов минерализации в высоко окультуренных дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах при разных уровнях минерального питания по активности целлюлозолитического и амилитического микробных сообществ; оценка направленности трансформации органического вещества по активности гидролитических и окислительных ферментов при разных условиях минерального питания.

**Материалы и методы исследований.** Исследования проведены в 2014–2015 гг. в полевом опыте на высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (ОАО «Гастелловское», Минский р-н). Агрохимическая характеристика пахотного слоя:  $pH_{KCl}$  – 6,00–6,29;  $P_2O_5$  – 729–855 мг/кг,  $K_2O$  – 406–473 мг/кг почвы, гумус – 2,03–2,57 %.

В 2014 г. возделывали яровую пшеницу Тома, в 2015 г. – яровой ячмень Стратус. Минеральные удобрения применяли в основное внесение и азотные (карбамид) – в подкормки. Солоmistый навоз внесен осенью 2012 г. под вспашку. Отбор почвенных образцов для биологических исследований проведен весной до внесения удобрений.

Активность целлюлозолитического микробного сообщества (ЦМС) почвы изучена в модельном эксперименте аппликационным методом, включавшим экспозицию целлюлозного материала в пахотном слое почвы в течение 43 суток, его извлечение и последовательную обработку растворами  $HCl$ ,  $Na_2CO_3$  и водой, доведение до постоянного веса и учет скорости его разложения [11].

Активность амилитического микробного сообщества (АМС) оценивали колориметрическим методом Т. А. Щербаковой [6], субстрат – водорастворимый крахмал. Для определения активности инвертазы использован колориметрический метод Т. А. Щербаковой [6; 11], субстрат – сахароза. Активность уреазы устанавливали методом Т. А. Щербаковой [6; 11], субстрат – мочевины. Активность оксидаз, полифенолоксидазы (ПФО) и пероксидазы (ПО), определяли по трансформации гидрохинона в почве [7; 11].

**Результаты и их обсуждение.** Целлюлозолитическое микробное сообщество ведет самый масштабный деструкционный процесс в цикле углерода почвы. В разложении целлюлозы участвуют бактерии, грибы, актиномицеты [3; 4; 12]. Использованный нами аппликационный метод позволяет получать актуальные показатели активности бактерий, грибов и актиномицетов, так как закладка целлюлозного материала в почву проводится в условиях полевого опыта с удобрениями. При этом инициация ЦМС происходит непосредственно в почве вариантов опыта с разными системами удобрения, что позволяет дифференцировать модификационную (внешнее антропогенное воздействие) и функциональную (естественная динамика вследствие внутренних причин) изменчивость [5]. Вышеперечисленные аргументы показывают, что активность ЦМС, определяемая аппликационным методом, наиболее объективно характеризует минерализующую способность почвы.

Минерализационная функция почвы обусловлена действием микробных ферментов. Ферментативный гидролиз целлюлозы – многостадийный процесс, на разных этапах катализ ведут специфические ферменты. Начальные стадии гидролиза идут внеклеточно (за счет выделения ферментов в среду), так как из-за больших размеров молекулы целлюлозы не могут проникать

в микробную клетку. Продукты частичного разложения, представляющие более короткие полимерные цепочки, поступают в микробные клетки и далее биохимические превращения идут внутриклеточно. Конечная стадия гидролиза – низкомолекулярные сахара, служащие источником энергии для абсолютного большинства микроорганизмов. С разложением целлюлозы связаны важнейшие почвенные процессы – образование гумуса и формирование почвенной структуры [3].

Второй по значимости полисахарид, поступающий в почву, – крахмал, его минерализация осуществляется АМС, также включающим бактерии, грибы и актиномицеты. Крахмал – запасной полисахарид, его содержание в разных органах растений – 70–80 %. Крахмал разлагают внеклеточные микробные ферменты под общим названием амилазы, с образованием декстринов, мальтозы, мальтотриозы и глюкозы [3; 4; 6]. Активность АМС – также важная характеристика минерализующей способности почвы.

Анализ данных за 2014–2015 гг. показал, что на высоко окультуренных дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах основными факторами стимулирования ЦМС и АМС, в которые входят микроорганизмы разной таксономической принадлежности, являются внесение навоза и азотных удобрений (табл. 1). На контроле без удобрений (100 %) активность ЦМС составила 2,6 мг/сутки, АМС – 1815 мг мальтозы/кг почвы. Одностороннее внесение азотных удобрений существенно усиливало процессы минерализации, что проявлялось в 3-кратном усилении активности ЦМС и активности АМС на 15–31 % по сравнению с контролем. Последствие 50 и 100 т/га навоза усиливало активность ЦМС в 2 и 2,5 раза, активность АМС – на 56 и 82 % соответственно. Внесение азота  $N_{60}$ ,  $N_{60+30}$ ,  $N_{90+30}$  по последствию 50 т/га навоза стимулировало деятельность ЦМС в 3,1–3,4 раза, АМС – на 70–91 %, 100 т/га навоза – в 3,8–4,1 раза и на 100–124 % соответственно. Внесение полного минерального удобрения,  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$ , как на фоне без навоза, так и по его последствию, способствовало сберегающему уровню активности ЦМС и АМС, ответственных за минерализацию в цикле углерода почвы.

Для сохранения плодородия высококультурной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы наиболее целесообразно внесение полного минерального удобрения, что позволяет получать высокую и устойчивую урожайность при сберегающем уровне минерализации органического вещества (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Урожайность сельскохозяйственных культур и активность ЦМС и АМС в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в зависимости от применения удобрений (2014–2015 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га		Активность ЦМС		Активность АМС	
	Яровая пшеница	Яровой ячмень	мг/сут	%	мг мальтозы/кг почвы/сут	%
Без удобрений	43,0	42,4	2,6	100	1815	100
$N_{60}$	54,7	59,8	7,9	304	2096	115
$N_{60+30}$	58,4	66,2	7,4	284	2138	118
$N_{90+30}$	62,5	69,9	7,9	304	2374	131
$N_{90+30}P_{15}K_{30}$	63,5	71,8	6,3	242	2017	111
П/д навоза, 50 т/га	53,4	48,9	5,3	204	2837	156
П/д навоза, 50 т/га + $N_{60}$	56,9	65,2	8,4	323	3085	170
П/д навоза, 50 т/га + $N_{60+30}$	58,3	69,3	8,1	312	3133	173
П/д навоза, 50 т/га + $N_{90+30}$	62,3	72,2	8,8	338	3476	191
П/д навоза, 50 т/га + $N_{90+30}P_{15}K_{30}$	64,8	74,3	8,1	312	2863	158
П/д навоза, 100 т/га	53,7	51,6	6,5	250	3300	182
П/д навоза, 100 т/га + $N_{60}$	57,1	66,3	9,8	377	3633	200
П/д навоза, 100 т/га + $N_{60+30}$	59,6	70,9	10,2	392	3993	220
П/д навоза, 100 т/га + $N_{90+30}$	62,1	73,7	10,7	412	4068	224
П/д навоза, 100 т/га + $N_{90+30}P_{15}K_{30}$	64,6	75,0	9,8	377	3327	183
Фактор А (орг. удобр.)			0,46		200,3	
Фактор В (мин. удобр.)	3,2	3,7	0,70		408,7	

П р и м е ч а н и е. П/д – последствие.

Таким образом, определяя активность ЦМС и АМС, характеризующие напряженность основных процессов минерализации в цикле углерода почвы, можно проводить сравнение и делать выбор в пользу систем удобрения со сберегающим уровнем минерализации, т. е. нормировать нагрузку по удобрениям с целью сохранения плодородия.

В течение 2014–2015 гг. определяли активность гидролитических (инвертаза, уреазы) и окислительных (полифенолоксидаза, пероксидаза) ферментов почвы.

Инвертазная активность служит диагностическим показателем способности почвы гидролизировать олигосахариды и накапливать растворимые низкомолекулярные сахара, являющиеся источником энергии для микроорганизмов. Показано, что одностороннее внесение азота, применение 50 и 100 т/га навоза, а также возрастающих доз азота на обоих фонах органики усиливали инвертазную активность – от 100 % на контроле до 145 и 183 % по годам исследований. Отмечено, что внесение полного минерального удобрения на всех блоках опыта вызывало тенденцию снижения инвертазной активности, наиболее выраженную на блоках без органики и по последствию 100 т/га навоза (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Активность гидролитических ферментов в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в зависимости от применения удобрений (ОАО «Гастелловское», 2014–2015 гг.)

Вариант	Инвертаза				Уреазы			
	мг глюкозы/кг		%		мг N–NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /кг		%	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Без удобрений	2196	2519	100	100	151	160	100	100
N <sub>60</sub>	3296	2782	150	110	175	172	116	108
N <sub>60+30</sub>	3309	2895	151	115	182	179	120	112
N <sub>90+30</sub>	3610	2970	164	118	164	182	109	114
N <sub>90+30</sub> P <sub>15</sub> K <sub>30</sub>	3186	2830	145	112	164	168	109	105
П/д навоза, 50 т/га	3271	2846	149	113	160	190	106	119
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>60</sub>	3136	3023	143	120	181	199	120	124
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>60+30</sub>	3666	3325	167	132	188	196	124	123
П/д.навоза, 50 т/га + N <sub>90+30</sub>	3760	3520	171	140	181	199	120	124
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>90+30</sub> P <sub>15</sub> K <sub>30</sub>	3561	3045	162	121	179	173	118	109
П/д навоза, 100 т/га	3722	3199	169	127	176	193	116	121
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>60</sub>	3892	3406	177	135	190	202	126	126
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>60+30</sub>	3986	3618	181	144	213	207	141	130
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>90+30</sub>	4022	3662	183	145	204	204	135	128
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>90+30</sub> P <sub>15</sub> K <sub>30</sub>	3384	3267	154	130	199	196	132	123
Фактор А (орг. добр.)	126,0	74,1			4,4	9,0		
Фактор В (мин. добр.)	162,6	95,7			6,2	11,6		

Установлено влияние ресурсосберегающих систем удобрения на уреазную активность, являющуюся диагностическим показателем способности почвы к минерализации азотсодержащих органических соединений и накоплению минерального азота. Для характеристики способности почвы накапливать минеральный азот наиболее целесообразно использовать активность ферментов завершающих стадий аммонификации, когда в почву поступает аммоний, который может быть непосредственно ассимилирован растениями и микроорганизмами [4; 13].

Установлено, что на фоне без органики одностороннее внесение азота на 9–20 и 8–14 % усиливали уреазную активность по отношению к контролю (100 %) по годам исследований. Внесение 50 т/га навоза повышало активность фермента на 6 и 19 %, 100 т/га навоза – на 16 и 21 %. Усиление уреазной активности почвы наблюдается также при внесении возрастающих доз азота на фоне органики (табл. 2).

По всем блокам полевого опыта прослеживается общая тенденция – при внесении N<sub>90+30</sub> P<sub>15</sub> K<sub>30</sub> отмечается некоторое снижение активности фермента, указывающее на замедление аммонифи-

кации (табл. 2). Учитывая то, что на этих вариантах опыта получена наибольшая урожайность (табл. 1), сберегающий уровень активности гидролаз следует оценивать как экологически целесообразный, способствующий большей сохранности органического вещества и предотвращающий его непродуцируемые потери.

Определена активность окислительных ферментов в почве (табл. 3). В настоящее время общепризнано, что катализаторами гумификации разлагающегося в почве органического вещества являются микробные оксидазы – полифенолоксидазы и пероксидазы [6; 14]. Активность оксидаз тесно коррелирует с содержанием гумуса. Полифенолоксидазы осуществляют катализ в присутствии кислорода воздуха, пероксидазы – за счет кислорода перекиси водорода.

Т а б л и ц а 3. Активность окислительных ферментов в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в зависимости от применения удобрений (ОАО «Гастелловское», 2014–2015 гг.)

Вариант	ПФО				ПО			
	мг БХ/кг		%		мг БХ/кг		%	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Без удобрений	26,3	27,9	100	100	34,8	51,5	100	100
N <sub>60</sub>	30,8	32,3	117	116	37,7	52,9	108	103
N <sub>60+30</sub>	31,2	33,0	119	118	38,1	52,8	109	103
N <sub>90+30</sub>	33,0	34,0	125	122	39,6	53,4	114	104
N <sub>90+30</sub> -P <sub>15</sub> -K <sub>30</sub>	33,0	36,2	125	130	39,6	54,3	114	105
П/д навоза, 50 т/га	30,1	32,3	114	116	41,0	51,5	118	100
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>60</sub>	31,5	34,5	120	124	42,4	55,8	122	108
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>60+30</sub>	34,5	35,4	131	127	43,4	54,8	125	106
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>90+30</sub>	33,4	34,9	127	125	42,9	56,2	123	109
П/д навоза, 50 т/га + N <sub>90+30</sub> -P <sub>15</sub> -K <sub>30</sub>	36,4	37,4	138	134	46,5	57,6	134	112
П/д навоза, 100 т/га	31,5	33,0	120	118	44,8	57,2	129	111
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>60</sub>	34,1	36,3	130	130	46,2	58,2	133	113
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>60+30</sub>	35,2	37,4	134	134	49,6	58,1	142	113
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>90+30</sub>	34,8	37,4	132	134	50,2	59,3	144	115
П/д навоза, 100 т/га + N <sub>90+30</sub> -P <sub>15</sub> -K <sub>30</sub>	37,6	38,9	143	139	52,4	62,8	150	123
Фактор А (орг. удобр.)	0,95	0,95			1,04	1,20		
Фактор В (мин. удобр.)	1,23	1,23			1,35	1,54		

П р и м е ч а н и е: ПФО – полифенолоксидаза, ПО – пероксидаза, БХ – 1,4 р-бензохинон.

Установлено, что на фоне без органики одностороннее внесение азота на 16–25 % усиливало активность ПФО и на 3–14 % активность ПО. Внесение 50 т/га навоза повышало активность ПФО на 14–16 %, активность ПО возрастала на 18 % или оставалась на уровне контроля. При внесении 100 т/га навоза активность ПФО возрастала на 18–20 %, активность ПО – на 11–29 % соответственно. Внесение возрастающих доз азота на обоих фонах органики способствовало повышению активности оксидаз.

При внесении N<sub>90+30</sub>-P<sub>15</sub>-K<sub>30</sub> на обоих фонах последствие навоза наблюдается усиление активностей ПФО и ПО, характеризующих скорость гумификации лигнинов (табл. 3). Усиление гумификации является объективным критерием для выбора наиболее экологичной системы удобрения, способствующей консервации и воспроизводству органического вещества.

По данным ферментативной диагностики представляется возможным оценивать соотношение интенсивностей минерализационных и гумификационных процессов, показывающее направленность трансформации органических веществ и изменения плодородия почвы под действием антропогенных факторов.

Для биохимической оценки активности процессов минерализации и гумификации энзиматические показатели сгруппированы по направленности действия ферментов в соответствии с пред-

ложенной нами методикой [7]. Относительная интенсивность минерализации (%) определена по активности гидролитических ферментов, активность гумификации (%) – по активности окислительных ферментов.

По средним данным за 2014–2015 гг. установлено влияние ресурсосберегающих систем удобрения на активность процессов минерализации в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Факторами усиления минерализации были последствие 50 и 100 т/га навоза – 21 и 33 % относительно контроля (100 %), а также одностороннее внесение азотных удобрений  $N_{60-120}$  (на фоне без навоза – на 21–26 %, по последствию 50 т/га – на 26–38 %, 100 т/га – на 40–49 %). Замедление минерализации органических веществ отмечено при внесении полного минерального удобрения  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$  (табл. 4).

Установлено влияние ресурсосберегающих систем удобрения на активность процессов гумификации в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Последствие 50 и 100 т/га навоза усиливало гумификацию – на 15 и 23 % соответственно относительно контроля (100 %), одностороннее внесение азота  $N_{60-120}$  – на 14–19 % на фоне без органики, на 22–26 % на фоне последствия 50 т/га навоза и на 31–36 % по последствию 100 т/га навоза. Внесение полного минерального удобрения  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$  способствовало дальнейшему усилению гумификации лигнинов растительных остатков – на 21, 33 и 43 % на фонах без органики и с разными дозами навоза соответственно (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Активность минерализации и гумификации в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в зависимости от применения удобрений (ОАО «Гастелловское», 2014–2015 гг.)

Вариант	Минерализация, %			Гумификация, %		
	2014 г.	2015 г.	Среднее	2014 г.	2015 г.	Среднее
Без удобрений	100	100	100	100	100	100
$N_{60}$	133	109	121	119	109	114
$N_{60+30}$	135	114	124	121	110	115
$N_{90+30}$	136	116	126	126	113	119
$N_{90+30}P_{15}K_{30}$	127	109	118	126	117	121
П/д навоза, 50 т/га	127	116	121	123	108	115
П/д навоза, 50 т/га + $N_{60}$	131	122	126	129	116	122
П/д навоза, 50 т/га + $N_{60+30}$	145	127	136	136	116	126
П/д навоза, 50 т/га + $N_{90+30}$	145	132	138	133	117	125
П/д навоза, 50 т/га + $N_{90+30}P_{15}K_{30}$	140	115	127	144	123	133
П/д навоза, 100 т/га	142	124	133	132	115	123
П/д навоза, 100 т/га + $N_{60}$	151	130	140	140	122	131
П/д навоза, 100 т/га + $N_{60+30}$	161	137	149	147	124	135
П/д навоза, 100 т/га + $N_{90+30}$	159	136	147	147	125	136
П/д навоза, 100 т/га + $N_{90+30}P_{15}K_{30}$	143	126	134	156	131	143

Таким образом, оценка направленности трансформации органических веществ по биохимическим показателям подтвердила выводы, сделанные по показателям активности ЦМС и АМС в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Для сохранения плодородия высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы экологически наиболее целесообразно внесение полного минерального удобрения,  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$ , что позволяет получать высокую и устойчивую урожайность при сберегающем уровне минерализации органического вещества: на фоне без органики и с ее внесением отмечается замедление минерализации в циклах С и N, а также усиление гумификации лигнинов растительных остатков, способствующее сохранности органического вещества.

**Заключение.** На основании сравнительного анализа активности целлюлозолитического и амилитического микробных сообществ и результатов диагностики по гидролитическим (инвертаза и уреазы) и окислительным (полифенолоксидаза и пероксидаза) ферментам установлены следующие

закономерности изменения биохимических показателей минерализации и гумификации органических веществ в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при ресурсосберегающих системах удобрения:

усиление минерализации и гумификации органических веществ при внесении солоमистого навоза и одностороннем внесении азотных удобрений на фоне последействия навоза;

превышение минерализации над гумификацией при внесении соломистого навоза: на фоне последействия 50 т/га навоза – на 6 %, 100 т/га навоза – на 10 %; при одностороннем внесении возрастающих доз азота  $N_{60-120}$  на фоне без навоза – на 7–9 %, на фоне последействия 50 т/га навоза – на 4–13 %, 100 т/га навоза – на 9–14 %;

при внесении полного минерального удобрения  $N_{90+30}P_{15}K_{30}$  отмечается наиболее высокая урожайность и благоприятное соотношение скорости процессов минерализации и гумификации: на фоне без органики – относительный баланс, по последействию 50 т/га навоза – сдвиг в сторону гумификации – 6 %, 100 т/га навоза – 9 %.

### Список использованной литературы

1. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2007–2010) / Ин-т почвоведения и агрохимии / под общ. ред. И. М. Богдевича. – Минск, 2012. – 276 с.
2. Лана, В. В. Плодородие почв Республики Беларусь, проблемы и перспективы / В. В. Лапа // Почвоведение и агрохимия. – 2010. – № 1(44). – С. 7–14.
3. Звягинцев, Д. Г. Биология почв / Д. Г. Звягинцев, И. Л. Бабьева, Г. М. Зенова. – М.: МГУ, 2005. – 445 с.
4. Speir, T. W. Hydrolytic enzyme activities to assess soil degradation and recovery / T. W. Speir, D. J. Ross // Enzymes in the environment: activity, ecology, and applications / eds. by R. P. Dick, R. G. Burns. – Город, 2002. – P. 407–431.
5. Микроорганизмы и охрана почв / под ред. Д. Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 с.
6. Щербакова, Т. А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т. А. Щербакова. – Минск: Наука и техника, 1983. – 221 с.
7. Биохимические и микробиологические критерии оценки плодородия почв и нормирования антропогенной нагрузки: Метод. рекомендации / В. В. Лапа [и др.]. – Минск: РУП «Институт почвоведения и агрохимии», 2015. – 40 с.
8. 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.
9. Caldwell, B. A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review / B. A. Caldwell // Pedobiologia. – 2005. – Vol. 49. – P. 637–644.
10. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment / M. Vepsalainen [et al.] // Soil Biol. Biochem. – 2001. – Vol. 33. – P. 1665–1672.
11. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М.: Наука, 2005. – 252 с.
12. Deng, S. P. Cellulase activity of soil / S. P. Deng, M. A. Tabatabai // Soil Biol. Biochem. – 1994. – Vol. 26, iss. 10. – P. 1347–1354.
13. Звягинцев, Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей / Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–52.
14. 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.

Поступило в редакцию 05.03.2016