

and unroot bringing are possible to be disposed in the next order of decrease: $Zn > B > Cu$. Variants with the use of the unroot additional fertilizing by zinc (Background + $Zn_{(0,15+0,15+0,15)}$) and especially with joint application of zinc and bor (Background + $B_{(0,1+0,1+0,1)} Zn_{(0,1+0,1+0,1)}$) have the most intensity of accumulation of general and underground biomass.

Поступила 16 ноября 2012 г.

УДК 631.461.5:631.559:633.22

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

**В.В. Лапа, Н.А. Михайловская, М.М. Ломонос,
М.С. Лопух, О.В. Василевская, Т.В. Погирницкая**
Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с актуальными задачами по достижению высокой и стабильной урожайности, качественной и конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции, необходимо своевременно решать сопряженные экологические задачи по контролю влияния интенсификации растениеводства на состояние почвенного плодородия [1–5]. Одним из основных критериев оценки изменений плодородия почв, вызываемых антропогенной деятельностью, является биологическое состояние почвы [3–5]. В современных условиях воспроизводство и сохранение плодородия почв, используемых в сельскохозяйственном производстве, являются приоритетными задачами. Поэтому все больше внимания уделяется изучению биологических свойств почв и биологических процессов, определяющих их плодородие.

Системы удобрения сельскохозяйственных культур являются одним из основных факторов, оказывающих существенное влияние на агрохимические, агрофизические и биологические свойства почвы, которые определяют ее плодородие, режим питания и урожайность сельскохозяйственных культур [5–7]. Оценка биологического состояния почв позволяет получить информацию о направленности и скорости протекания процессов трансформации органического вещества почвы и определить экологически обоснованные системы удобрения, обеспечивающие высокую и устойчивую урожайность сельскохозяйственных культур при сберегающем уровне биологической активности для сохранения плодородия почвы.

Для оценки биологического состояния почв в настоящее время используется широкий спектр показателей, что обусловлено многообразием функций почвенных микроорганизмов. Для диагностических целей наибольший интерес представляют показатели активности, или интенсивности, ключевых микробиологических процессов формирования плодородия. Такую возможность дает проведение почвенных биохимических исследований. В основе микробного метаболизма лежит работа ферментов, которые катализируют все биохимические реакции и являются интеграль-

ной частью круговорота элементов питания в почве. Почвенные ферменты имеют преимущественно микробное происхождение [8], доля ферментов растительного и животного происхождения значительно меньше [9]. Ферменты накапливаются в почве и образуют пул (запас), который рассматривается как результат ежегодного развития микроорганизмов в почве. Ферментативная активность является чувствительным индикатором биохимической деятельности микробных сообществ почвы.

Аргументами в пользу ферментативной диагностики являются относительная простота измерения и быстрый отклик на антропогенное воздействие. По сравнению с другими показателями изменения ферментативной активности, вызванные антропогенными факторами, регистрируются на более ранних этапах, что позволяет использовать эти показатели для ранней диагностики нежелательных экологических тенденций [10].

Преимуществом ферментативной диагностики является более высокая стабильность ферментативных параметров по сравнению с другими показателями биологической активности [5]. Внеклеточные ферменты, составляющие значительную часть ферментного пула почвы, находятся в стабилизированном состоянии за счет прочных связей с ее минеральными и органическими компонентами [11, 12]. Стабилизированные внеклеточные ферменты устойчивы к протеолизу, защищены от инактивации, длительно сохраняют активность и функционируют при неблагоприятных условиях дефицита влаги и элементов питания, то есть в тех условиях, когда микробная деятельность обычно подавлена.

Несмотря на экологическую значимость ферментативной диагностики, влияние систем удобрения на ключевые биохимические процессы, формирующие плодородие, слабо исследовано. Актуальность таких исследований обусловлена недостатком информации по этой проблеме и необходимостью оценки систем удобрения с биологических позиций. Ферментативная диагностика нужна для своевременного предупреждения развития негативных экологических процессов.

Цель исследований – установить влияние систем удобрения сельскохозяйственных культур на активность ключевых биохимических процессов, связанных с циклами углерода и азота (аммонификации, минерализации углеводов, гумификации), в дерново-подзолистой, легкосуглинистой почве и определить экологически наиболее обоснованную систему удобрения, обеспечивающую сберегающий уровень биологической активности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Биохимические исследования проведены на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, развивающейся на мощном лессовидном суглинке, в длительном стационарном опыте по оценке эффективности различных систем удобрения сельскохозяйственных культур (СПК «Щемяслица», Минский р-н).

Схема стационарного опыта предусматривала внесение трех доз азота на разных уровнях фосфорно-калийного питания – N_{18-54} без внесения РК (за счет использования их почвенных запасов), в расчете на дефицитный ($N_{18-54} P_{30} K_{66}$) и поддерживающий ($N_{18-54} P_{60} K_{132}$) балансы фосфора и калия в почве. Органические удобрения вносят общим фоном – 8 т/га севооборотной площади.

Исследования проводились в зерно-травяном севообороте: пелюшко-овсяная смесь – озимая тритикале с подсевом клевера – клевер луговой 1-ого г.п. – клевер

2. Плодородие почв и применение удобрений

луговой 2-ого г.п. – яровая пшеница. Схема опыта содержит 17 вариантов удобрений в 4-кратной повторности. Общий размер делянки – 69 м² (11,5 м x 6 м). Учетная площадь делянки – 43 м² (9,55 м x 4,5 м).

Схема полевого опыта и среднегодовые дозы удобрений

Вариант	Ø на 1 га
Без удобрений	–
Навоз – фон 1	8 т
Фон 1 + N ₁	N ₁₈
Фон 1 + N ₂	N ₃₆
Фон 1 + N ₃	N ₅₄
Фон 1 + N ₂ P ₁	N ₃₆ P ₃₀
Фон 1 + N ₂ K ₁	N ₃₆ K ₆₆
Навоз+P ₁ K ₁ – фон 2	P ₃₀ K ₆₆
Фон 2 + N ₁	N ₁₈ P ₃₀ K ₆₀
Фон 2 + N ₂	N ₃₆ P ₃₀ K ₆₀
Фон 2 + N ₃	N ₅₄ P ₃₀ K ₆₀
Навоз+P ₂ K ₂ – фон 3	P ₆₀ K ₁₃₂
Фон 3 + N ₁	N ₁₈ P ₆₀ K ₁₃₂
Фон 3 + N ₂	N ₃₆ P ₆₀ K ₁₃₂
Фон 3 + N ₃	N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂
Фон 3+N ₃ (дробно)	N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂
Фон 3+N ₄ (дробно)	N ₇₂ P ₆₀ K ₁₃₂

Ферментативная диагностика почвы в полевом опыте проведена по гидролитическим (инвертаза и уреазы) и окислительным (полифенолоксидаза и пероксидаза) ферментам в соответствии с разработанной в лаборатории микробиологии и биохимии почв системой биодиагностики почвенного плодородия. Ферментативную активность определяли в воздушно-сухих почвенных образцах. Активность инвертазы определяли колориметрическим методом, предложенным Т.А. Щербаковой, с использованием сахарозы в качестве ферментного субстрата; для определения количества редуцирующих сахаров, образующихся в результате ферментативной реакции, использована динитросалициловая кислота [13]. Для оценки уреазной активности почвы использован метод Т.А. Щербаковой, в котором ферментным субстратом служит мочевины, а для количественного определения аммония применяется реактив Несслера [14]. Для определения активности почвенных оксидаз, полифенолоксидазы и пероксидазы использован колориметрический метод, разработанный Л.А. Карягиной, Н.А. Михайловской с применением гидрохинона в качестве ферментного субстрата, где активность ферментов устанавливается по количеству бензохинона, образовавшегося в результате ферментативной реакции [15].

В 2011 г. анализировали почвенные образцы, отобранные на поле 1, в 2012 г. биохимические исследования проведены в почвенных образцах поля 2 (СПК «Щемыслица»).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате длительного применения разных систем удобрения сельскохозяйственных культур на поле 1 сформированы разные уровни насыщенности пахотного

слоя дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы Р и К на разных блоках опыта. Диапазоны содержания подвижного фосфора в почве составляют 250–409 мг/кг P_2O_5 , подвижного калия – 99–309 мг/кг K_2O . Различия по содержанию гумуса в почве – в пределах 1,73–1,98 %, по уровню кислотности почвы – 5,8–6,0 (табл. 1).

Пахотный слой почвы поля 2 характеризовался близкими агрохимическими свойствами: различия по уровням насыщенности подвижными формами фосфора и калия составили 250–410 мг/кг P_2O_5 и 86–295 мг/кг K_2O соответственно, по содержанию гумуса в почве – 1,79–2,03 %, по уровню кислотности – 5,9–6,0 (табл. 2).

Наиболее высокие показатели продуктивности зерно-травяного севооборота, 126,2 и 124,5 ц к.ед./га, получены на блоке опыта с поддержанием баланса фосфора и калия в почве при дробном внесении азотных удобрений $N_{54}P_{60}K_{132}$ и $N_{72}P_{60}K_{132}$ (табл. 1). Высокие показатели продуктивности, в пределах 123,8–126,2 ц к.ед./га, отмечены также при внесении полных доз азота N_{18} , N_{36} и N_{54} на фонах $P_{60}K_{132}$. При использовании остаточных количеств фосфора и калия в почве (N_{18-54}) и при их дефицитном балансе в почве ($N_{18-54}P_{30}K_{66}$) продуктивность сельскохозяйственных культур была ниже и составила 113,6–116,3 и 120,1–123,4 ц к.ед./га соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Агрохимическая характеристика пахотного слоя дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и продуктивность зерно-травяного севооборота (СПК «Щемыслица», поле 1)

№	Вариант \emptyset на 1 га	pH	Гумус, %	P_2O_5 , мг/кг (0,2н НСl)	K_2O , мг/кг (0,2н НСl)	Продуктив- ность, ц к.ед./га
1	Без удобрений	6,0	1,73	250	99	93,4
2	Навоз, 8 т/га – фон	6,0	1,87	254	127	103,9
3	N_{18}	6,0	1,87	271	144	113,6
4	N_{36}	6,0	1,90	282	148	116,3
5	N_{54}	5,9	1,83	293	156	115,0
6	$N_{36}P_{30}$	6,0	1,91	333	154	119,1
7	$N_{36}K_{66}$	5,9	1,85	300	223	120,7
8	$P_{30}K_{66}$	5,9	1,79	367	236	113,0
9	$N_{18}P_{30}K_{66}$	5,8	1,89	366	230	120,1
10	$N_{36}P_{30}K_{66}$	5,8	1,83	373	213	123,4
11	$N_{54}P_{30}K_{66}$	5,9	1,98	361	217	121,7
12	$P_{60}K_{132}$	5,9	1,93	398	312	118,1
13	$N_{18}P_{60}K_{132}$	5,9	1,91	398	309	123,8
14	$N_{36}P_{60}K_{132}$	5,9	1,84	403	308	126,2
15	$N_{54}P_{60}K_{132}$	5,8	1,89	409	306	123,8
16	* $N_{54}P_{60}K_{132}$	5,8	1,92	402	305	126,2
17	* $N_{72}P_{60}K_{132}$	5,8	1,85	397	301	124,5

Примечание: N – дробное внесение.

Ключевыми экологическими функциями почвы являются синтез и минерализация органических веществ [16]. При интенсивной антропогенной нагрузке важно контролировать способность почвы сохранять и поддерживать эти функции. Так как все

2. Плодородие почв и применение удобрений

процессы синтеза и минерализации органических веществ в почве катализируются ферментами и являются биохимическими по природе, то ферментативная диагностика почв становится удобным инструментом для осуществления такого контроля.

Таблица 2

Агрохимическая характеристика пахотного слоя дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (СПК «Щемяслица», поле 2)

№	Вариант σ на 1 га	pH	Гумус, %	P ₂ O ₅ , мг/кг (0,2н HCl)	K ₂ O, мг/кг (0,2н HCl)
1	Без удобрений	6,1	1,79	250	86
2	Навоз, 8 т/га – фон	6,1	1,87	251	121
3	N ₁₈	6,1	1,92	272	145
4	N ₃₆	6,1	1,93	286	143
5	N ₅₄	6,1	1,95	284	153
6	N ₃₆ P ₃₀	6,1	1,99	322	154
7	N ₃₆ K ₆₆	6,1	1,98	282	213
8	P ₃₀ K ₆₆	6,0	1,90	357	223
9	N ₁₈ P ₃₀ K ₆₆	6,1	1,95	357	222
10	N ₃₆ P ₃₀ K ₆₆	5,9	1,92	360	205
11	N ₅₄ P ₃₀ K ₆₆	6,0	1,96	354	199
12	P ₆₀ K ₁₃₂	6,0	2,03	401	297
13	N ₁₈ P ₆₀ K ₁₃₂	6,0	1,98	410	295
14	N ₃₆ P ₆₀ K ₁₃₂	6,0	1,97	406	289
15	N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	5,9	1,96	409	285
16	*N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	6,0	1,96	402	275
17	*N ₇₂ P ₆₀ K ₁₃₂	6,0	1,95	393	273

Примечание: N – дробное внесение.

Для диагностических целей наиболее целесообразно использовать энзиматические показатели, тесно связанные с циклами основных биогенных элементов, в особенности углерода и азота. В наших исследованиях по оценке систем удобрения сельскохозяйственных культур использованы показатели активности гидролитических ферментов – инвертазы (цикл углерода) и уреазы (цикл азота), а также окислительные ферменты – полифенолоксидаза и пероксидаза, участвующие в цикле углерода в почве.

Инвертаза осуществляет катализ гидролитического разложения сахарозы и играет критическую роль в высвобождении низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы, которые служат источником энергии для микроорганизмов [17]. Таким образом, инвертазная активность почвы в значительной степени определяет общий уровень биогенности почвы и ее обогащенность микробной биомассой.

Уреазная активность почвы служит диагностическим показателем способности почвы накапливать минеральный азот. Уреаза является также гидролитическим ферментом, она катализирует разложение мочевины на угольную кислоту и аммоний. Значимость этого фермента, действующего на завершающих стадиях процессов аммонификации, обусловлена его критической ролью в высвобождении неорганического азота в форме аммония, который в дальнейшем непосредственно ассимилируется как растениями, так и почвенными микроорганизмами [18].

Важнейшими составляющими цикла углерода в почве считаются микробные оксидазы – полифенолоксидазы и пероксидазы [19, 20, 21]. Эти ферменты играют определяющую роль в биохимических процессах гумификации поступающих в почву растительных остатков, содержащих в своем составе лигнины. Микробные оксидазы катализируют окисление ароматических соединений до хинонов, которые способны вступать в реакции конденсации с аминокислотами и пептидами с образованием гуминовых кислот [19, 22]. Для оценки интенсивности биохимических процессов гумификации при разных системах удобрения использовали показатели полифенолоксидазной и пероксидазной активности почвы.

Дифференциация по агрохимическим свойствам в результате длительного применения разных систем удобрения оказала значительное влияние на изученные биохимические показатели дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. В таблицах 2 и 3 представлены результаты ферментативной диагностики дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Установлены четкие различия по интенсивности процессов аммонификации (уреаза), минерализации углеводов (инвертаза), а также по активности процессов гумификации растительных остатков (полифенолоксидазы и пероксидазы) на блоках опыта с разными системами удобрения сельскохозяйственных культур.

При системе удобрения, рассчитанной на использование остаточных количеств P и K в почве с внесением трех доз азотных удобрений – N_{18} , N_{36} и N_{54} , отмечены минимальные по опыту уровень ферментативной активности и продуктивность зерно-травяного севооборота. Диапазоны варьирования показателей инвертазной активности составили 1589–1917 мг глюкозы/кг, уреазной – 135–169 мг $N-NH_4^+$ /кг, полифенолоксидазной – 36,2–40,3 мг хинона/кг, пероксидазной – 35,3–42,3 мг хинона/кг (табл. 3, 4). Содержание гумуса в почве – 1,83–1,95 %, подвижного фосфора – 271–293 мг/кг, калия – 143–156 мг/кг почвы. Продуктивность культур при этом находилась в пределах 113,6–116,3 ц к.ед./га (табл. 1, 2).

Применение системы удобрения, рассчитанной на дефицит фосфора и калия в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве ($N_{18-54}P_{30}K_{66}$), привело к повышению ее ферментативной активности. Диапазоны варьирования показателей инвертазной активности почвы составили 1848–2087 мг глюкозы/кг, уреазной – 167–185 мг $N-NH_4^+$ /кг, полифенолоксидазной – 41,8–46,5 мг хинона/кг, пероксидазной – 35,8–49,1 мг хинона/кг (табл. 3, 4). Активизация биохимических процессов связана с повышением содержания гумуса до 1,83–1,98 %, подвижного фосфора – до 361–373 мг/кг, калия – до 199–230 мг/кг. Продуктивность культур севооборота также возросла до 120,1–123,4 ц к.ед./га (табл. 1, 2).

При поддерживающей системе удобрения сельскохозяйственных культур ($N_{18-54}P_{60}K_{132}$) содержание гумуса в почве достигло 1,84–1,98 %, подвижного фосфора – 398–410 мг/кг, калия – 285–309 мг/кг (табл. 1, 2). В этих условиях установлено наиболее значимое в опыте усиление гидролитической трансформации углеводов и азотсодержащих органических соединений с высвобождением доступных моносахаридов и аммония. Диапазоны варьирования показателей активности инвертазы в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве составили 2275–2933 мг глюкозы/кг, уреазы – 188–210 мг $N-NH_4^+$ /кг. Одновременно с ростом минерализующей способности почвы отмечено повышение скорости биохимических процессов гумификации лигнинов растительных остатков. Диапазоны варьирования показателей полифенолоксидазной активности составили 44,7–50,5 мг хинона/кг,

2. Плодородие почв и применение удобрений

пероксидазной – 40,0–54,9 мг хинона/кг почвы (табл. 3, 4). Продуктивность сельскохозяйственных культур повысилась до 123,8–126,2 ц к.ед./га (табл. 1).

Применение поддерживающей системы удобрения с дробным внесением азотных удобрений – N_{54} и N_{72} на фонах $P_{60}K_{132}$, которая обеспечивала наиболее высокую продуктивность севооборота, 126,2 и 124,5 ц к.ед./га (табл. 1), способствовало поддержанию более умеренных (сберегающих) показателей активности гидролитических ферментов в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Установленные диапазоны варьирования параметров инвертазной активности составили 1993–2294 мг глюкозы/кг, уреазной – 185–193 мг $N-NH_4^+$ /кг, полифенолоксидазной – 42,8–53,0 мг хинона/кг, пероксидазной – 36,6–54,6 мг хинона/кг (табл. 3, 4). Содержание гумуса в почве находилось в пределах 1,85–1,96 %, подвижного фосфора – 393–402 мг/кг, калия – 273–305 мг/кг (табл. 1, 2).

Результаты ферментативной диагностики показали значимость системы удобрения сельскохозяйственных культур и обеспеченности почвы элементами минерального питания для активности протекания основных биохимических процессов, формирующих плодородие почвы – аммонификации, минерализации поли- и олигосахаридов, гумификации растительных лигнинов.

Таблица 3

Ферментативная активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зависимости от системы удобрения (поле 1, 2011 г.)

Варианты опыта	Уреаза, мг $N-NH_4^+$ /кг	Инвертаза, мг глюкозы/кг	ПФО, мг хинона/кг	ПО, мг хинона/кг
Без удобрений	149,1	1279	34,0	32,4
Навоз, 8 т/га – фон	158,9	1504	35,2	32,4
N_{18}	165,2	1589	36,7	35,3
N_{36}	168,0	1842	37,4	36,2
N_{54}	169,4	1917	40,3	37,2
$N_{36}P_{30}$	168,0	2218	38,9	36,7
$N_{36}K_{66}$	176,4	2087	40,9	40,0
$P_{30}K_{66}$	165,2	1993	40,7	36,2
$N_{18}P_{30}K_{66}$	169,4	1974	41,8	35,8
$N_{36}P_{30}K_{66}$	178,5	2068	41,9	38,6
$N_{54}P_{30}K_{66}$	173,6	2087	44,0	39,6
$P_{60}K_{132}$	182,0	2294	43,3	36,7
$N_{18}P_{60}K_{132}$	193,2	2331	44,7	40,0
$N_{36}P_{60}K_{132}$	199,5	2745	47,2	41,0
$N_{54}P_{60}K_{132}$	210,0	2933	47,8	42,0
* $N_{54}P_{60}K_{132}$	193,2	1993	43,8	36,6
* $N_{72}P_{60}K_{132}$	191,0	2294	42,8	38,6
НСР ₀₅	18,5	283,4	2,9	4,6

Примечание: N – дробное внесение.

Исследованы четыре показателя энзиматической активности почвы, для определения которых используются специфичные ферментативные субстраты [13–15].

Активность изученных ферментов выражена в разных единицах и представлена количеством превращенного субстрата за единицу времени (табл. 3, 4). В биологических науках для анализа и сравнения подобных экспериментальных данных нередко используется метод Дж. Ацци [23], который позволяет выразить изучаемые характеристики в относительных единицах (%) по отношению к контролю.

Таблица 4

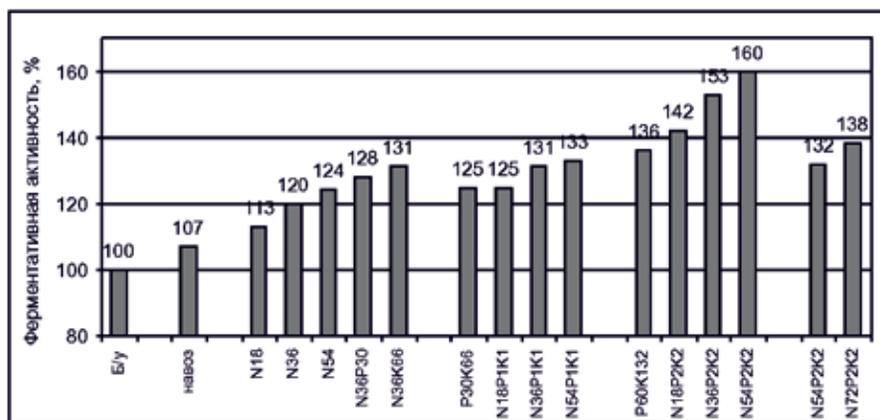
Ферментативная активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зависимости от системы удобрения (поле 2, 2012 г.)

Варианты опыта	Уреаза, мг N-NH ₄ ⁺ /кг	Инвертаза, мг глюкозы/кг	ПФО, мг хинона/кг	ПО, мг хинона/кг
Без удобрений	112,2	1415	32,7	35,8
Навоз, 8 т/га – фон	128,1	1616	36,4	41,4
N ₁₈	135,0	1634	36,2	40,2
N ₃₆	140,3	1712	37,3	40,8
N ₅₄	146,3	1778	38,9	42,3
N ₃₆ P ₃₀	158,2	1693	40,1	40,1
N ₃₆ K ₆₆	164,6	1730	38,5	40,0
P ₃₀ K ₆₆	155,5	1802	44,0	42,7
N ₁₈ P ₃₀ K ₆₆	167,2	1848	45,4	46,7
N ₃₆ P ₃₀ K ₆₆	177,2	1959	46,1	47,4
N ₅₄ P ₃₀ K ₆₆	185,1	1981	46,5	49,1
P ₆₀ K ₁₃₂	169,2	2128	47,2	53,2
N ₁₈ P ₆₀ K ₁₃₂	187,5	2275	48,5	53,7
N ₃₆ P ₆₀ K ₁₃₂	194,7	2463	49,3	54,6
N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	205,4	2543	50,5	54,9
*N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	184,6	2043	52,2	54,6
*N ₇₂ P ₆₀ K ₁₃₂	193,1	2141	53,0	54,6
НСР ₀₅	16,2	161,3	2,7	4,3

Примечание: N – дробное внесение.

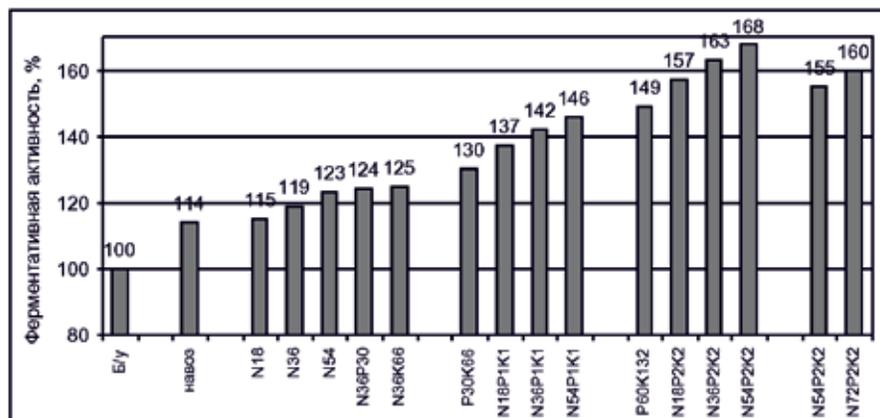
Сравнительный анализ показал, что при системе удобрения, ориентированной на использование остаточных количеств фосфора и калия в почве (N₁₈₋₅₄), общий уровень ферментативной активности оценивается как 113–124 % (в 2011 г. – 113–124 %, в 2012 г. – 115–123 %). При применении системы удобрения, рассчитанной на дефицит фосфора и калия в почве (N₁₈₋₅₄P₃₀K₆₆), общая ферментативная активность варьирует в пределах 125–146 % (в 2011 г. – 125–133 %, в 2012 г. – 137–146 %). При поддерживающей системе удобрения сельскохозяйственных культур (N₁₈₋₅₄P₆₀K₁₃₂) происходит значимое усиление ферментативной активности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы до 142–168 % (в 2011 г. – 142–160 %, в 2012 г. – 157–168 %). Наиболее обоснованный, сберегающий, уровень ферментативной активности 132–160 % (в 2011 г. – 132–138 %, в 2012 г. – 155–160 %) отмечается при поддерживающей системе удобрения сельскохозяйственных культур, предусматривающей дробное внесение N₅₄ и N₇₂ на фонах P₆₀K₁₃₂ и обеспечивающей наиболее высокую продуктивность севооборота (табл. 1, рис. 1, 2).

2. Плодородие почв и применение удобрений



$P_{1K_1} - P_{30K_{66}}; P_{2K_2} - P_{60K_{132}}$

Рис. 1. Ферментативная активность (%) дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зависимости от системы удобрения (поле 1, 2011 г.)



$P_{1K_1} - P_{30K_{66}}; P_{2K_2} - P_{60K_{132}}$

Рис. 2. Ферментативная активность (%) дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в зависимости от системы удобрения (поле 2, 2012 г.)

Как было отмечено выше, в расчетный показатель общей ферментативной активности почвы были включены все четыре исследованных энзиматических теста. Представляло интерес дать оценку интенсивности более специфических биохимических процессов, связанных с минерализацией органических веществ в почве [17–18]. Для этого энзиматические показатели группировали по направленности действия ферментов и рассчитали общую интенсивность минерализации (%) по активности гидролитических ферментов инвертазы и уреазы, также используя метод Дж. Ацци [23]. Общую активность гидролитических ферментов рассматривали как характеристику минерализующей способности почвы. Установлено, что самый высокий уровень минерализационных процессов в течение двух лет исследований был отмечен на вариантах $N_{36}P_{60}K_{132}$ и $N_{54}P_{60}K_{132}$ – 175 и 185 % в 2011 г., 174 и 182 % в 2012 г. При дробном внесении азотных удобрений (N_{54} и N_{72} на фонах $P_{60}K_{132}$)

установлено существенное снижение скорости минерализации органических веществ до 143 и 154 % в 2011 г., а также до 155 и 162 % в 2012 г. (табл. 5).

Таблица 5

Показатели активности минерализации и гумификации в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (поле 1, 2011 г.)

Варианты	Минерализация, %			Гумификация, %		
	уреаза	инвертаза	среднее	ПФО	ПО	среднее
Без удобрений	100	100	100	100	100	100
Навоз, 8 т/га – фон	107	118	113	104	100	102
N ₁₈	111	124	118	108	109	109
N ₃₆	113	144	129	110	112	111
N ₅₄	114	150	132	119	115	117
N ₃₆ P ₃₀	113	173	143	114	113	114
N ₃₆ K ₆₆	118	163	141	120	123	122
P ₃₀ K ₆₆	111	156	134	120	112	116
N ₁₈ P ₃₀ K ₆₆	114	154	134	123	110	117
N ₃₆ P ₃₀ K ₆₆	120	162	141	123	119	121
N ₅₄ P ₃₀ K ₆₆	116	163	140	129	122	126
P ₆₀ K ₁₃₂	122	179	151	127	113	120
N ₁₈ P ₆₀ K ₁₃₂	130	182	156	131	123	127
N ₃₆ P ₆₀ K ₁₃₂	134	215	175	139	127	133
N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	141	229	185	141	130	136
*N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	130	156	143	129	113	121
*N ₇₂ P ₆₀ K ₁₃₂	128	179	154	126	119	123

Примечание: N – дробное внесение.

Аналогичным образом можно дать оценку интенсивности ферментативных процессов, связанных с гумификацией органических веществ в почве. С этой целью рассчитали общую активность окислительных ферментов (полифенолоксидазы и пероксидазы), учитывая их ключевую роль в процессах гумификации растительных лигнинов [19–21]. Общую активность оксидаз (%) рассматривали как характеристику гумифицирующей способности почвы. Следует отметить, что полученные данные отличались по годам исследований. В 2011 г. наиболее высокие показатели скорости гумификации отмечены на вариантах N₃₆P₆₀K₁₃₂ и N₅₄P₆₀K₁₃₂ – 133 и 136 %, а при дробном внесении азотных удобрений (N₅₄ и N₇₂ на фонах P₆₀K₁₃₂) установлено снижение скорости гумификации до 121 и 123 %. В 2012 г. отмечали обратную тенденцию: на вариантах с дробным внесением азота скорость гумификации составляла 157 и 158 % по сравнению с 152 и 154 % на вариантах N₃₆P₆₀K₁₃₂ и N₅₄P₆₀K₁₃₂ (табл. 6).

При изучении влияния систем удобрения сельскохозяйственных культур на биологический статус почвы оценка скорости минерализации и гумификации органических веществ по соответствующим группам ферментативных параметров позволяет выделить системы удобрения, оказывающие экологически оптимальное воздействие на почву. Особенно важны контроль и оценка интенсивности

2. Плодородие почв и применение удобрений

минерализационных процессов, чтобы выявить предпочтительные системы удобрения, обеспечивающие сберегающий уровень минерализации органического вещества почвы.

Таблица 6

Показатели активности минерализации и гумификации в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (поле 2, 2012 г.)

Варианты	Минерализация, %			Гумификация, %		
	уреаза	инвертаза	среднее	ПФО	ПО	среднее
Без удобрений	100	100	100	100	100	100
Навоз, 8 т/га – фон	114	114	114	111	116	114
N ₁₈	120	115	118	111	112	112
N ₃₆	125	121	123	114	114	114
N ₅₄	130	126	128	119	118	119
N ₃₆ P ₃₀	141	120	131	123	112	118
N ₃₆ K ₆₆	147	122	135	118	112	115
P ₃₀ K ₆₆	139	127	133	135	119	127
N ₁₈ P ₃₀ K ₆₆	149	131	140	139	130	135
N ₃₆ P ₃₀ K ₆₆	158	138	148	141	132	137
N ₅₄ P ₃₀ K ₆₆	165	140	153	142	137	140
P ₆₀ K ₁₃₂	151	150	151	144	149	147
N ₁₈ P ₆₀ K ₁₃₂	167	161	164	148	150	149
N ₃₆ P ₆₀ K ₁₃₂	174	174	174	151	153	152
N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	183	180	182	154	153	154
*N ₅₄ P ₆₀ K ₁₃₂	165	144	155	160	153	157
*N ₇₂ P ₆₀ K ₁₃₂	172	151	162	162	153	158

Примечание: N – дробное внесение.

В настоящее время в развитых странах основной целью применения удобрений является обеспечение стабильной урожайности на достаточно высоком уровне и устойчивости земледелия, предусматривающее поддержание и сохранение плодородия почв, используемых в сельскохозяйственном производстве. Интенсивное антропогенное воздействие может оказывать негативное влияние на ключевые биохимические процессы в почвах, в особенности на скорость и направленность биохимической трансформации органического вещества [3, 4, 5]. При возрастающем уровне антропогенной нагрузки может отмечаться ускорение всех этапов малого биологического круговорота веществ и энергии и повышение биологической активности почв, которое может сопровождаться ускоренной минерализацией органического вещества и приводить к развитию процессов деградации плодородия [3, 10]. В связи с этим очевидна целесообразность исследований по биологической или ферментативной диагностике, чтобы контролировать влияние интенсификации растениеводства на почвенное плодородие [4, 10].

Проведение ферментативной диагностики способствует определению приемов экологически оптимального воздействия на почву. В нашем случае ферментативная диагностика позволила установить экологически наиболее обоснованные системы удобрения, обеспечивающие высокую продуктивность сельскохозяйственных культур при сохранении сберегающего уровня ферментативной активности

почвы. Умеренный уровень активности гидролитических ферментов способствует сохранности органического вещества почвы.

Таким образом, проведена биохимическая диагностика по инвертазной, уреазной, полифенолоксидазной и пероксидазной активности почвы с целью экологической оценки разных систем удобрения сельскохозяйственных культур. В результате исследований получены новые количественные данные по их влиянию на ферментативную активность, интенсивность биохимических процессов минерализации и гумификации органических веществ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Установлена экологически наиболее обоснованная система удобрения.

Предложенные биохимические показатели активности минерализации и гумификации органических веществ могут использоваться для обоснования приемов экологически оптимального воздействия на почву, биологического нормирования антропогенной нагрузки, оценки биологического статуса, качества и здоровья почвы.

ВЫВОДЫ

С целью экологической оценки разных систем удобрения сельскохозяйственных культур проведена ферментативная диагностика дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы по параметрам, характеризующим интенсивность биохимических процессов аммонификации, минерализации углеводов и гумификации лигнинов растительных остатков, которые играют значимую роль в формировании и поддержании почвенного плодородия.

Сравнительный анализ данных ферментативной диагностики, продуктивности севооборота и агрохимических свойств показал, что на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве наиболее обоснованной является система удобрения, ориентированная на поддержание баланса фосфора и калия в почве с дробным внесением азотных удобрений N_{54} и N_{72} на фонах $P_{60}K_{132}$, которая обеспечивала наиболее высокую продуктивность зерно-травяного севооборота (126,2 и 124,5 ц к.ед./га) при сберегающем уровне ферментативной активности почвы (132–160 %) и минерализации органических веществ (143–162 %).

Более высокие показатели общего уровня ферментативной активности почвы были отмечены при поддерживающей системе удобрения ($N_{18-54}P_{60}K_{132}$) – 142–168 %, при этом регистрировали повышенную инвертазную (2275–2933 мг глюкозы/кг) и уреазную (187,5–210,0 мг $N-NH_4^+$ /кг) активность и, следовательно, усиление минерализации углерод- и азотсодержащих органических соединений почвы, которая составила 156–185 %. При системах удобрения, ориентированных на использование остаточных количеств P и K в почве (N_{18-54}), а также при дефиците фосфора и калия ($N_{18-54}P_{30}K_{66}$) общий уровень ферментативной активности (113–124 % и 125–146 % соответственно) и минерализации органических веществ (118–132 % и 134–153 % соответственно) был понижен, продуктивность севооборота составила 113,6–115,0 и 120,1–123,4 ц к.ед./га соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудеяров, В.Н. Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия / В.Н. Кудеяров, В.М. Семенов // Почвоведение. – 2004. – № 12. – С. 1440–1446.

2. Богдевич, И.М. Концепция повышения плодородия почв Республики Беларусь / И.М. Богдевич, Н.И. Смяян, В.В. Лапа // Ахова раслін. – 2002. – № 1. – С. 8–11.
3. Туев, Н.А. Экологические проблемы интенсивного земледелия / Н.А. Туев // Вестн. с.-х. науки. – 1988. – № 6. – С. 91–95.
4. Dick, R.P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. / R.P. Dick // *Agr. Ecosys. Environ.* – 1992. – № 40. – P. 25–36.
5. Звягинцев, Д.Г. Биология почв / Д.Г. Звягинцев, И.Л. Бабьева, Г.М. Зенова. – МГУ, 2005. – 445 с.
6. Лапа, В.В. Продуктивность зерно-травяного севооборота и изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / В.В. Лапа, М.М. Ломонос // *Почвоведение и агрохимия.* – 2010. – № 1(44). – С. 73–79.
7. Лапа, В.В. Параметры изменения агрохимических свойств дерново-подзолистой супесчаной почвы в зависимости от севооборотов и систем удобрения / В.В. Лапа, Н.Н. Ивахненко // *Почвоведение и агрохимия.* – 2009. – № 2(43). – С. 7–22.
8. Ladd, J.N. Origin and range of enzymes in soil / J.N. Ladd // *Soil Enzymes* / Ed. R.G. Burns. – London, 1978. – P. 51–96.
9. Tabatabai, M.A. 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. 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.]. – Soil Science Society of America, Madison, 1994. – P. 107–124.
11. Щербакова, Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / Т.А. Щербакова. – Минск: Наука и техника, 1983. – 221 с.
12. 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.
13. Щербакова, Т.А. К методике определения активности инвертазы и амилазы в почве / Т.А. Щербакова // *Сборник докладов по ферментам почвы.* – Минск, 1968. – С. 453–455.
14. Хазиев, Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Ф.Х. Хазиев. – М.: Наука, 1990. – 189 с.
15. Карагіна, Л.А. Вызначэнне актыўнасці поліфенолаксідазы і пераксідазы ў глебе / Л.А. Карагіна, Н.А. Міхайлоўская // *Весці АН БССР. Сер. с/г навук.* – 1986. – № 2. – С. 40–41.
16. IFOAM (International Federation of organic agricultural movements). Basic standards for organic production and processing. – Belgium: European communities, 1998.
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. Fractionation of humus-urease complexes / B. Ceccanti [et al.] // *Soil Biol. Biochem.* – 1978. – № 10. – P. 39–45.
19. Александрова, Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л.Н. Александрова. – Л.: Наука, 1980. – С. 122–133.

20. 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, № 5. – P. 983–988.

21. Kirk, T.K. Enzymatic “combustion”: the microbial degradation of lignin / T.K. Kirk, R.L. Ferrell // Annu. Rev. Microbiol. – 1987. – V. 41. – P. 465–505.

22. Туев, Н.А. Микробиологические процессы гумусообразования / Н.А. Туев. – Москва: Агропромиздат. – 1989. – 237 с.

23. Ацци, Ж. Сельскохозяйственная экология / Ж. Ацци. – М., 1959. – 479 с.

EFFECT OF FERTILIZER SYSTEM ON ENZYMATIC ACTIVITY OF LUVISOL LOAMY SAND SOIL

V.V. Lapa, N.A. Mikhailouskaya, M.M. Lomonos,
M.S. Lopukh, O.V. Vasilevskaya, T.V. Poghiritskaya

Summary

Basing on the data of enzymatic tests, activity of soil organic substances mineralization (hydrolytic enzymes) as well as agrochemical properties and crop productivity we found that split application of N_{54} and N_{72} at backgrounds of $P_{60}K_{132}$ were environmentally acceptable on Luvisol loamy sand soil.

Поступила 1 ноября 2012 г.

УДК 633.18:631.452

ДИНАМИКА АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ РИСА

О.А. Гуторова, А.Х. Шеуджен

*Всероссийский научно-исследовательский институт риса,
г. Краснодар, Российская Федерация*

ВВЕДЕНИЕ

Специфические условия возделывания риса обуславливают многие особенности пищевого и гумусового режима почв, вызванные тем, что после затопления исчезает свободный кислород и в них преобладают сильно выраженные восстановительные процессы. Это сказывается на условиях питания растений и приводит к большой подвижности гумуса. Практически полностью исчезают из корнеобитаемого слоя почвы такие важные источники минерального питания растений, как нитраты и сульфаты. Затопление рисового поля сопровождается понижением в почве окислительно-восстановительного потенциала, увеличением активности водородных ионов, накоплением закисных форм железа и восстановленных продуктов, повышением степени дисперсности почвы, мобилизацией минеральных элементов питания [1–4].

Преобладание в почве анаэробных процессов приводит к уменьшению количества гумуса в связи с возрастанием его подвижности, изменению качествен-