

УДК 631.4:577.151/ 158

ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭРОЗИОННОГО СТРЕССА

Н. Б. ПРОНИНА, Г. И. БАЗДЫРРВ

(Кафедра сельскохозяйственной биотехнологии,
кафедра земледелия и методики опытного дела)

Полученные в исследованиях данные свидетельствуют, что почвосберегающие технологии имеют много преимуществ, а показатели ферментативной активности почвы могут быть использованы в качестве диагностического критерия при оценке экологической ситуации в агрофитоценозе. Использованный гербицид дифезан — комбинированный препарат широкого спектра действия — при регламентированном применении не оказывал отрицательного влияния на агроэкосистему.

Почвенно-эрозионные процессы развиваются под действием комплекса тесно взаимосвязанных причин, характер проявления каждой из которых определяется экологическими факторами. Поэтому системно-экологическая методология, раскрывающая свойства почвы через экологические связи формирующих факторов, применяется при изучении развития эрозионных процессов и их влияния на свойства почвы, в данном случае на ее ферментативную активность. В то же время эрозия выступает в качестве компонента экологических

параметров, определяющих пространственную динамику ферментного уровня почвы.

Изменение ферментативной активности почвы в результате эрозии — сложный процесс, обусловленный в первую очередь изменением, в большинстве случаев ухудшением тех свойств, которые определяют ферментативную активность почвы (физические, физико-химические, химические свойства, биомасса почвенных организмов и их активность) и которые в значительной степени функционально зависят от ферментативной активности почвы (содержа-

ние подвижных органических и минеральных соединений, активность окислительно-восстановительных процессов и т. д.). Следовательно, в процессе эрозии не только уносятся из почвы ферменты в составе дисперсной органоминеральной части, но и в остающейся почве могут ухудшиться условия для новообразования и действия ферментов. Иначе говоря, в почве нарушается функционирование звеньев продуцирования и активности ферментов. По-видимому, в результате изменения органического комплекса и иловой фракции условия адсорбции и стабилизации ферментов в почве также изменяются. Следовательно, сдвиги в ферментном комплексе почвы — это не только унаследованное свойство от горизонтов (слоев), которые оказались на поверхности в результате эрозии. По этому вопросу имеется немало обстоятельных исследований [2, 4, 5].

Среди изученных ферментов наблюдается наиболее адекватная реакция активности инвертазы и протеазы на изменения свойств эродированных почв. Это объясняется тем, что эти оба фермента обуславливают два наиболее важных процесса в почве: инвертаза — обмен углеводов, главных энергетических источников в почве, а протеаза — начальный этап метабо-

лизма азотсодержащих органических соединений. В процессе эрозии в почве снижается количество углеводов и органического азота, что, в свою очередь, обуславливает соответствующее снижение активности инвертазы и протеазы [1, 4, 9, 12].

В данной работе мы попытались выяснить влияние различных технологий обработки почвы склоновых земель и системы гербицидов на биохимическую активность почвы. Были поставлены следующие задачи:

1) оценить нитратный статус почвы под действием следующих экологических факторов: различных почвообрабатывающих технологий, гербицида дифезана, погодных условий в период выращивания растений и элементов склона;

2) выяснить роль нитратредуктазы — одного из ключевых ферментов азотного обмена почвы как диагностического показателя для оценки экологической ситуации в агрофитоценозе;

3) проанализировать уменьшение содержания минерального фосфора в пахотном и корнеобитаемом горизонтах и сравнить эти результаты с активностью АТФ-азы и пирофосфатазы — основных ферментов, ответственных за гидролиз органических соединений фосфора. Оценить роль этих ферментов

как диагностических показателей для определения экологического статуса почвы в условиях эрозионного стресса и проследить за изменением активности нитрат- и нитритредуктазы в листьях возделываемых культур и сопоставить эти метаболические параметры с содержанием нитратов в растениях;

4) привести расчетные данные по коэффициенту корреляции между активностью ферментов и агрохимическими показателями почвы на примере фосфогидролаз.

Методика

Исследования выполнены в стационарном опыте: «Разработка научных основ защиты почвы от эрозии и сорняков в условиях интенсивного земледелия» в учхозе «Михайловское» Подольского района Московской области. Опыт заложен в 1977 г. в севообороте во времени: ячмень (1978) + травы — травы (1979) — озимая пшеница (1980) — овес (1981). Экспозиция склона южная с крутизной 3,5°. В качестве экологических факторов изучали минимальную и обычную обработку почвы (фактор А), систему гербицидов (фактор В) и элементы склона (фактор С).

Почвенный покров в верхней части склона представлен в основном дерново-сла-

бо- и среднеподзолистыми среднесуглинистыми слабо-смытыми почвами, у которых частично смыт гумусовый горизонт А. Нижняя часть склона представлена преимущественно намытыми дерново-подзолистыми почвами тяжелого гранулометрического состава (илватопылеватые суглинки, подстилаемые мореной). Система удобрений рассчитана с учетом агрохимической характеристики пахотного слоя на положительный баланс питательных элементов и планируемую урожайность: ячменя — 4,0 т; многолетних трав — 8 т сена; озимой пшеницы — 5 т; овса — 3 т. Исходная агрохимическая характеристика пахотного слоя следующая: С — 0,79%; гумус — 1,36%; общий азот — 0,13%; P_2O_3 — 14 мг/100 г; K_2O — 14,6 мг/100 г; pH_{KCl} — 6,34; гидролитическая кислотность — 2,4 мг • экв/100 г; сумма обменных оснований — 14,6 мг • экв/100 г [4]. Применялась технология выращивания сельскохозяйственных культур, общепринятая для зоны. Использовались сорта озимой пшеницы и овса, включенные в Реестр сортов и рекомендованные к выращиванию в центре России. Варианты систем гербицидов следующие: 1 — без гербицидов, 0; 2 — насыщение гербицидами 50% (при-

меняли в 2 полях севооборота); 3 — насыщение гербицидами 100% (применяли на всех 4 полях севооборота). В качестве контроля использовали вариант с обычной вспашкой без внесения гербицидов.

В отдельные годы применяли базагран, аминную соль 2.4-Д, глин, 2М-4ХП, лонтрел, диален, прометрин, 2М-4Х, дифезан — смесь хлорсульфурина и диалена в рекомендованных дозах. Содержание нитратов в почве определяли с помощью ион-селективных электродов, минеральный фосфор — по Кирсанову, активность ферментов в почве — по Галстяну [4, 5], активность нитрат-редуктазы в растениях — по накоплению нитритов в инкубационной среде с реагентом Грисса, содержание нитратов в растениях — с использованием нитрат-теста с дифениламином. Пробы почвы отбирали в слое 0—10 см, 10-20, 20-40 см, а для анализа растений брали 4 разбитых листа сверху. Сроки взятия образцов: 1-й — в фазе трубкования до обработки дифезаном, 2-й — через 3 нед. после обработки посевов дифезаном, 3-й срок совпадал с моментом уборки урожая (брали только почвенные образцы). Приводятся результаты исследований за 1998 и 1999 гг.

Результаты

Характеризуя ферментативную активность почвы, исследователи имеют в виду суммарный показатель активности: иммобилизованные в почве свободные внеклеточные ферменты, а также те ферменты, которые локализованы на поверхности клеток функционирующих организмов и входят в состав связанных с почвой дезагрегирующихся клеточных фрагментов, а также еще не закрепленные в почве внеклеточные ферменты и т. п. [1, 3, 6, 8].

Метаболические параметры азотного обмена почвы и растений

Основная масса азота почвы входит как в состав гумуса в виде белковых фракций и продуктов их гидролиза — аминокислот, связанных с полифенолами, сахарами и минеральной частью почвы, так и в состав других азотсодержащих органических соединений — адениннуклеотидов, нуклеиновых кислот и их производных, аминокислот и т. д. Азоторганические соединения самой почвы и азоторганические соединения, поступающие в почву в составе органических остатков, претерпевают сложные биохимические превращения, в процессе которых они пе-

реходят в доступные растениям формы [8], в первую очередь — нитраты. Согласно полученным результатам (табл. 1), по мере действия гербицидов в почве наблюдалось возрастание уровня нитратов по сравнению с контролем в оба года исследований (верх склона). Под пшеницей в вариантах с минимальной обработкой почвы содержание нитратов к кон-

цу вегетации увеличивалось в 3-6 раз, а при обычной вспашке — в 1,5-2 раза. В нижней части склона при использовании почвозащитной технологии (минимальная обработка) эта тенденция сохранялась, а в вариантах со вспашкой пик накопления нитратов был связан с первичной реакцией почвы на действие дифезана через 3 нед. после нанесения пре-

Т а б л и ц а 1

Влияние почвозащитных технологий и гербицидов на содержание нитратов в почве (слой 0-40 см; в % к контролю*)

Вариант	Верх склона			Низ склона		
	1-й срок	2-й срок	3-й срок	1-й срок	2-й срок	3-й срок
Минимальная обработка:						
0% гербицидов	<u>30,7</u> ** 25,1	<u>125,5</u> 37,9	<u>187,8</u> 225,2	<u>44,8</u> 32,9	<u>113,9</u> 33,0	<u>107,9</u> 84,8
50% — » —	<u>60,5</u> 26,7	<u>203,8</u> 56,7	<u>250,4</u> 162,8	<u>17,8</u> 73,5	<u>53,2</u> 27,7	<u>171,2</u> 75,9
100% — » —	<u>40,6</u> 78,9	<u>145,6</u> 109,5	<u>238,8</u> 112,8	<u>37,4</u> 84,4	<u>82,3</u> 40,7	<u>173,4</u> 78,4
Обычная вспашка:						
0% гербицидов (контроль)	<u>100,0</u> 100,0	<u>100,0</u> 100,0	<u>100,0</u> 100,0	<u>114,0</u> 39,1	<u>218,9</u> 39,1	<u>129,5</u> 79,8
50% — » —	<u>51,2</u> 29,2	<u>84,8</u> 48,6	<u>134,5</u> 163,5	<u>48,0</u> 17,7	<u>262,0</u> 49,4	<u>87,0</u> 63,4
100% — » —	<u>67,5</u> 11,4	<u>231,6</u> 24,5	<u>91,4</u> 96,4	<u>50,0</u> 28,3	<u>122,8</u> 38,7	<u>67,6</u> 73,0

* За контроль принят 4-й вариант (с обычной вспашкой при 0% насыщения гербицидами; содержание нитратов (мг/кг почвы) в контроле в опыте 1998 г. составляло: 1-й срок — 40,4; 2-й — 7,9; 3-й — 13,9 (возделываемая культура — озимая пшеница Мироновская 808); в 1999 г. — соответственно 137,2; 50,6; 28,2 (возделываемая культура — овес).

** В числителе данные 1998 г., в знаменателе — 1999 г.

парата. В засушливых условиях 1999 г. запасы нитратов в почве под овсом в большинстве вариантов оказались ниже, чем в предыдущем году, когда были более благоприятные погодные условия: при обычной вспашке обнаружена тенденция к увеличению запасов нитратов к моменту уборки урожая, при минимальной — резкое снижение (в 2,0-2,5 раза) уровня NO_3 во 2-й срок, т. е. через 3 нед. после обработки растений дифезаном.

Согласно полученным результатам (табл. 2) в большинстве вариантов отношение 0—20 см/20—40 см под овсом по содержанию нитратов в почве в 1,5—4,0 раза выше, чем под пшеницей, что было связано со значительной аккумуляцией N — NO_3 в верхнем слое почвы (1999 г.). В засушливых условиях 1999 г. нитраты слабо использовались растениями овса из-за дефицита влаги; это обстоятельство имеет большое значение, поскольку поступление нитратов в растения идет с водным током, а в условиях засухи такой транспорт затруднен. На основании полученных результатов трудно сказать, насколько эффективной для запасаения нитратов (через 3 нед. после опрыскивания растений дифезаном) оказалась минимальная обработка почвы, поскольку во многих вариан-

тах в оба года исследований различия по этому показателю были недостоверными.

Кроме нитратов, в почве контролировали уровень нитритов. При длительном действии дифезана к моменту уборки в вариантах с применением почвозащитной технологии количество нитритов сохранилось на уровне контроля, а содержание нитратов составило от 225 до 113% к контролю, снижаясь параллельно с увеличением гербицидной нагрузки.

Запасание нитратов — основной доступной для растений формы азотсодержащих соединений почвы — связано со многими биохимическими реакциями. В почве одним из путей пополнения запасов нитратов являются 2 процесса нитрификации: зависимый от кислорода (аэробный) и нелимитированный кислородом (анаэробный).

При аэробнозисе аммиачный азот окисляется до нитратной формы при участии нитрифицирующих микроорганизмов. В окислении аммония через промежуточные стадии до нитрата принимают участие различные окислительные ферменты. Биохимические механизмы нитрификации долгое время оставались спорными. В настоящее время в очень упрощенном представлении считается, что в начальную стадию под действием фер-

Т а б л и ц а 2

**Влияние гербицидов и почвозащитных технологий
на содержание нитратов в пахотном (0—20 см)
и корнеобитаемом слое (20-40 см) почвы
(мг/кг; через 3 нед. после обработки препаратом)**

Вариант	Слой почвы	Верх склона		Низ склона	
		N-NO ₃	<u>0-20</u> <u>20-40</u>	N-NO ₃	<u>0-20</u> <u>20-40</u>
Минимальная обработка:					
0% гербицидов	0-20	<u>7,04*</u>		<u>6,29</u>	
		15,76	<u>2,77**</u>	14,60	<u>2,36</u>
	20-40	<u>2,54</u>	4,48	<u>2,66</u>	6,95
		3,50		2,10	
50% — » —	0-20	<u>10,13</u>		<u>2,57</u>	
		21,52	<u>3,36</u>	12,26	<u>1,57</u>
	20-40	<u>3,01</u>	2,29	<u>1,64</u>	7,04
		7,20		1,74	
100% — » —	0-20	<u>9,55</u>		<u>5,24</u>	
		51,43	<u>4,97</u>	15,80	<u>4,12</u>
	20-40	<u>1,92</u>	12,85	<u>1,27</u>	3,29
		4,0		4,80	
Обычная вспашка:					
0% гербицидов (контроль)	0-20	<u>6,26</u>		<u>13,12</u>	
		46,29	<u>3,91</u>	24,20	<u>3,12</u>
	20-40	<u>1,60</u>	10,72	<u>2,66</u>	10,52
		4,32		2,30	
50% — » —	0-20	<u>4,32</u>		<u>15,45</u>	
		22,20	<u>1,83</u>	22,0	<u>2,92</u>
	20-40	<u>2,36</u>	9,25	<u>5,30</u>	7,33
		2,40		3,00	
100% — » —	0-20	<u>14,30</u>		<u>7,00</u>	
		10,31	<u>3,56</u>	17,50	<u>2,63</u>
	20-40	<u>4,02</u>	2,33	<u>2,66</u>	8,41
		4,42		2,08	
* В числителе данные 1998 г., в знаменателе — 1999 г.					
** Отношение содержания N-NO ₃ в слое 0-20 см к корнеобитаемому слою (20-40 см) по данным опыта 1998 г. (числитель) к результатам 1999 г. (знаменатель). НСР по N-NO ₃ по всей таблице составляет: 1,20 мг/кг — для 1998 г.; 2,25 мг/кг — для 1999 г.					

ментов бактерии рода *Nitrosomonas* аммоний окисляется до гидроксилamina. В этой реакции участвуют медьсодержащие цитохромоксидазные ферменты, которые применительно к почве названы аммонийоксидазами [14, 15]. Затем гидроксилamin через промежуточные реакции окисляется при участии гидроксилamинооксидаз в нитриты. Дальнейшее окисление нитритов в нитраты осуществляют ферменты бактерий рода *Nitrobacter*. Здесь участвуют железосодержащие цитохромоксидазные ферменты — например, нитритоксидаза [15].

В дальнейшей эволюции нитратного азота, особенно в условиях анаэробнозиса, существенное значение имеют процессы денитрификации — восстановление его до аммиака (ассимиляторная денитрификация). В цепи редукции нитратов до аммиака, исследованной в данной работе, в почве и растениях участвует последовательно действующая система ферментов денитрифицирующих бактерий и растений: НАДФ-зависимая нитратредуктаза (КФ 1.6.6.1-3 НР), НАДФ-зависимая нитратредуктаза (КФ 1.6.6.4 НР) и НАДФ-зависимая нитритредуктаза (КФ 1.6.6.11 НИР). С помощью этих ферментных систем в анаэробных условиях денитрифицирующие микроорганизмы ис-

пользуют кислород нитратов в качестве акцептора водорода в процессе дыхания. В настоящее время факты обнаружения «нитратного» дыхания установлены и для растений в условиях гипоксии. В результате нитраты восстанавливаются до аммиака, который включается во многие синтетические реакции (например, синтез аминокислот в результате аминирования органических кислот и др.).

Согласно полученным данным (табл. 3), активность НР почвы в нижней части склона была выше, чем наверху, что связано с более высокой влажностью почвы в нижних вариантах. Наверху склона почвозащитная (минимальная) обработка способствовала активированию фермента в 1,5—2,0 раза по сравнению с контролем. Особенно значительное активирование НР обнаружено в нижней части склона: к концу вегетации наблюдалось 6-кратное возрастание НР-активности. При обычной вспашке активирование фермента в этих вариантах было в 1,9-1,4 раза больше, чем в контроле. В верхней части склона обычная обработка почвы не способствовала восстановлению нитратов. Этот факт зависел и от уровня насыщения гербицидами. Например, при 50% насыщении установлено заметное ингибирование НР-активности, веро-

Таблица 3

Активность нитратредуктазы в почве в условиях эрозионного стресса (в слое 0-40 см; мг $\text{NO}_2/\text{г}$ почвы за сутки; опыт 1998 г., возделываемая культура — озимая пшеница Мироновская 808)

Вариант	Верх склона			Низ склона		
	1-й срок	2-й срок	3-й срок	1-й срок	2-й срок	3-й срок
Минимальная обработка:						
0% гербицидов	<u>5949,8*</u> 105,1	<u>3541,8</u> 212,5	<u>2159,7</u> 217,6	<u>5605,8</u> 99,0	<u>4352,0</u> 261,2	<u>5701,8</u> 574,4
50% — » —	<u>5702,9</u> 100,7	<u>2605,3</u> 156,3	<u>1591,4</u> 160,3	<u>3853,0</u> 68,0	<u>4547,1</u> 272,9	<u>5938,2</u> 598,2
100% — » —	<u>6072,1</u> 107,2	<u>2356,1</u> 141,4	<u>1435,6</u> 144,6	<u>2755,3</u> 48,7	<u>2903,4</u> 174,2	<u>3671,2</u> 369,8
Обычная вспашка:						
0% гербицидов (контроль)	<u>5661,8</u> 100,0	<u>1666,4</u> 100,0	<u>992,7</u> 100,0	<u>4048,0</u> 71,5	<u>1516,2</u> 91,0	<u>1918,5</u> 193,3
50% — » —	<u>4210,0</u> 74,4	<u>678,5</u> 41,0	<u>541,5</u> 54,5	<u>4640,2</u> 82,0	<u>2008,1</u> 120,5	<u>2678,3</u> 270,0
100% — » —	<u>5733,2</u> 101,3	<u>901,8</u> 54,1	<u>1484,3</u> 149,5	<u>3054,6</u> 54,0	<u>2162,7</u> 130,0	<u>4405,7</u> 443,8
НСР для активности НР (по всей таблице)	108,5	117,3	155,0			
* В числителе — активность НР, в знаменателе — % к контролю (4-й вариант).						

ятно, из-за снижения уровня нитратов в этих вариантах (ср. с табл. 1). Высокие скорости восстановления нитратов при применении почвозащитной технологии, очевидно, можно объяснить более высокой микробиологической активностью, обусловленной в первую очередь активным нитрифицирующим комплексом [3, 6, 7]. В опыте 1999 г. показатели

НР-активности по всем вариантам были ниже, что можно объяснить более низким содержанием нитратов в этих вариантах.

Определение активности НР и НИР в листьях пшеницы проводили до и после обработки растений дифезаном (табл. 4). Выяснилось, что на верху склона через 3 нед. после нанесения препарата во всех вариантах наблюдалось

Активность нитрат (НР) - и нитредуктазы (НИР) в листьях озимой пшеницы
Мироновская 808 при использовании различных почвообрабатывающих технологий
и гербицидов

(НР в $\frac{\text{мкг NO}_2 \text{ (накопление)}}{\text{г сухой почвы}}$ ч, НИР в $\frac{\text{мг NO}_2 \text{ (убыль)}}{\text{г сухой почвы}}$ ч, 1998 г.)

Вариант	Верх склона				Низ склона					
	НР		НИР		НР		НИР			
	1-й срок	2-й срок	1-й срок	2-й срок	1-й срок	2-й срок	1-й срок	2-й срок		
Минимальная обработка:										
0% гербицидов	2317,7*	2203,8	18,58	12,79	690,3	1510,7	10,51	15,02		
	377,6	119,8	203,7	97,3	112,5	82,0	115,2	11,4		
50% — » —	1374,3	1508,4	18,34	15,73	510,0	1021,6	11,18	13,26		
	223,9	81,9	201,1	119,7	83,1	55,5	122,6	100,9		
100% — » —	908,5	1259,1	11,65	14,61	1046,3	1496,9	19,59	14,05		
	148,0	68,4	127,7	89,9	170,5	81,3	214,8	106,9		
Обычная вспашка:										
0% гербицидов (контроль)	613,7	1840,0	9,12	13,14	756,5	912,0	11,46	12,35		
	100,0	100,0	100,0	100,0	123,3	49,6	125,6	94,0		
50% — » —	963,7	1204,0	14,09	14,40	1966,3	1008,0	19,52	13,79		
	157,0	65,4	154,5	109,6	320,4	54,8	214,0	104,9		
100% — » —	679,8	679,6	10,85	13,91	1629,3	1547,5	22,28	13,42		
	110,8	36,9	119,0	105,8	265,5	84,1	244,3	102,1		

НСР по всей таблице для НР- и НИР-активности согласно срокам взятия проб составила 122,0; 122,0 и 1,13; 1,35.

* В числителе активность фермента, в знаменателе - % к контролю (4-й вариант).

значительное активирование восстановления нитратов, если судить по удельной активности ферментов. По мере возрастания гербицидной нагрузки на фитоценоз (0-50-100%) обнаруживалось блокирование НР-активности по сравнению с контролем, особенно заметное в вариантах с обычной вспашкой.

Скорость восстановления нитритов под действием дифезана зависела от технологии обработки почвы: при применении почвозащитной технологии снижение НР-активности по отношению к контролю составило от 2,1—1,7 до 1,4 раза, а при обычной вспашке — от 1,0—1,4 до 1.1 раза.

В нижней части склона в большинстве вариантов НР- и НР-активность в 1-й срок взятия проб (до обработки дифезаном) превышала контроль при минимальной обработке в 1,1—2,1 раза, а при обычной вспашке — в 1,2—3.2 раза. Гербицид вызвал инактивирование нитратредуктазы и не оказал существенного влияния на восстановление нитритов (НИР). Этот факт не является неожиданным, т. к. по своим свойствам НИР является ферментом, скорость «оборачиваемости» которого превышает НР в 20-25 раз, поэтому даже в условиях, когда блокируется 1-й этап цепи

редукции нитратов, активность НИР не отличается от контроля, очевидно, также и за счет использования дополнительных источников нитритов — субстратов действия НИР [13].

Энзимология процессов дефосфорилирования фосфорорганических соединений в почве

Поступающие в почву в составе органических остатков и накопленные там органические фосфаты постоянно подвергаются действию фосфогидролитических ферментов микроорганизмов и почвы. Как многообразны формы фосфорорганических соединений, так и многообразны ферменты, осуществляющие гидролиз этих соединений — это неспецифические фосфомоноэстеразы и специфические деполимеразы (РНК-аза, ДНК-аза, фосфодиэстераза, неорганические полифосфогидролазы), фитазы и другие.

Дефосфорилирование простых фосфорорганических соединений, таких, как сахарофосфаты, нуклеотиды и ненасыщенные фосфором формы инозитфосфатов, происходит под действием неспецифических фосфатаз (фосфомоноэстераз) и поэтому указанные простые фосфорорганические соединения гидролизуются интенсивно и

в почве не накапливаются в значительных количествах. Очень сложен цикл катаболизма экзогенных нуклеиновых кислот в почве. В почвах скорость деполимеризационной реакции нуклеиновых кислот в несколько раз ниже скорости фосфогидролазной реакции нуклеотидов. Вероятно, это явление обусловлено участием в дефосфорилировании нуклеотидов других неспецифических фосфогидролаз, которые активны в отношении многих фосфорных эфиров органических соединений [1, 4, 10, 16].

Мы изучали активность АТФ-азы — представителя группы неспецифических гидролаз, катализирующих отщепление фосфорной группировки (группировок) от АТФ — адениннуклеотида — универсального аккумулятора энергии химических связей. Нам неизвестны литературные сведения об изучении этого фермента в почве при совместном действии гербицидов и способов обработки почвы.

Согласно полученным результатам (табл. 5), на верху склона во всех вариантах содержание минерального фосфора в слое 0—20 см больше, чем в корнеобитаемом слое почвы в оба срока взятия проб (до и после обработки гербицидом). Это соответствует изменениям активности АТФ-азы. Ответная

реакция на действие гербицида зависела от способа обработки почвы: при минимальной обработке гидролиз АТФ протекает с меньшей скоростью, чем при обычной вспашке. При применении почвозащитной технологии наиболее четко прослеживается зависимость между активностью АТФ-азы и содержанием минерального фосфора в среде. В варианте с обычной вспашкой такой четкой закономерности не обнаружено: под действием дифезана наряду со снижением активности фермента по профилю почвы возрастает соотношение концентрации Фн между 1-ми 2-м сроками взятия проб.

В нижней части склона при минимальной обработке почвы содержание минерального фосфора во всех вариантах выше, что связано и с активированием АТФ-азы. Взаимосвязь этих двух метаболических показателей изменяется по профилю почвы. Наибольшая сопряженность скорости гидролиза АТФ с содержанием Фн в почве доказывается результатами корреляционного анализа (R). Так, при минимальной обработке почвы и 1-м сроке взятия пробы показатель составил 0,71; 2-м — 0,64; 3-м — 0,94; в случае обычной вспашки — соответственно 0,54; 0,17; 0,47.

Из приведенных результатов следует, что корреля-

Таблица 5
Активность АТФ-азы и содержание минерального фосфора в пахотном (0-20 см) и корнесобитаемом (20-40 см) слоях почвы в условиях эрозионного стресса (опыт 1998 г., озимая пшеница)

Вариант	Слой почвы	Верх склона				Низ склона			
		АТФ-аза (А)		Фн	Фн0-20 Фн20-40	АТФ-аза (А)		Фн	Фн0-20 Фн20-40
		А0-20 А20-40	А0-20 А20-40	19,2 16,1	3,49 2,78	А0-20 А20-40	А0-20 А20-40	3,57 3,53	25,8 28,9
Минимальная обработка: 0% гербицидов	0-20	1235,8 1182	2,74 2,70	19,2 16,1	3,49 2,78	1544,2 1494,3	3,57 3,53	25,8 28,9	3,07 3,36
	20-40	450,9 437,7		5,5 5,8		432,0 422,6		8,4 8,6	
50% — » —	0-20	1111,2 1111,3	2,82 2,11	20,9 19,1	3,87 3,67	1324,0 1464,6	3,13 3,75	24,3 28,7	2,73 3,72
	20-40	394,3 326,4		5,4 5,2		422,6 390,5		8,9 7,7	
100% — » —	0-20	886,7 935,8	2,55 2,18	16,2 16,1	2,84 2,77	1007,4 1294,2	2,16 2,50	25,3 28,7	3,46 2,93
	20-40	347,1 428,3		5,7 5,8		466,0 516,9		7,3 9,8	
Обычная вспашка: 0% гербицидов (контроль)	0-20	1025,4 1220,6	2,42 2,88	16,6 16,1	3,19 3,16	1147,0 1218,8	2,88 3,51	23,6 25,2	2,59 3,27
	20-40	423,5 424,5		5,2 5,1		398,1 347,1		9,1 7,7	
50% — » —	0-20	1137,3 1277,3	2,88 2,47	15,6 20,4	3,54 3,92	1175,4 1167,8	2,81 2,73	26,1 23,9	2,44 2,32
	20-40	394,3 516,9		4,4 5,2		416,9 426,4		10,7 10,3	
100% — » —	0-20	1207,5 1075,4	2,46 2,38	18,6 17,1	2,35 3,29	990,4 1179,2	2,61 2,92	18,6 21,0	2,55 2,96
	20-40	490,6 450,9		7,9 5,2		379,2 403,7		7,3 7,1	

НСР по всей таблице для АТФ-азы: 1-й срок — 25,46; 2-й — 23,72; для Фн: 1-й срок — 0,57; 2-й — 1,00.
Показатели для АТФ-азы и Фн: в числителе — до обработки гербицидом, в знаменателе — через 3 нед. после опрыскивания дифезаном.

ционная зависимость между этими показателями в соответствии с литературными градациями обозначается: при минимальной обработке почвы по срокам взятия проб как сильная, средняя, сильная; при обычной вспашке — соответственно средняя, слабая, средняя.

Можно привести еще пример с результатами изучения

	1-й	2-й	3-й
Минимальная обработки почвы	0,89	0,86	0,46
Градация корреляционной зависимости	Сильная	Сильная	Средняя
Обычная вспашка	0,55	0,32	0,59
Градация корреляционной зависимости	Средняя	Средняя	Средняя

Как видно, связь между активностью АТФ-азы, пиррофосфатазы и минеральным фосфором (минерализацией органического фосфора) довольно сложная, о чем свидетельствуют, в частности, противоречивые литературные данные об отношении фосфатазной активности почв к содержанию минерального фосфора. По этому вопросу различными исследователями получены альтернативные результаты: с одной стороны, положительная связь фосфатазной активности с содержанием активного фосфора в почве и при внесении в почву фосфорных удобрений, а с другой — отрицательная зависимость. Отмечается также и

активности неорганической полифосфогидролазы, к которой относится пиррофосфатаза, использующая в качестве субстрата своего действия пиррофосфаты почвы. Намечаются следующие корреляционные зависимости между скоростью гидролиза пиррофосфатов почвы и содержанием в ней подвижного фосфора (R) по срокам взятия проб:

	1-й	2-й	3-й
Минимальная обработки почвы	0,89	0,86	0,46
Градация корреляционной зависимости	Сильная	Сильная	Средняя
Обычная вспашка	0,55	0,32	0,59
Градация корреляционной зависимости	Средняя	Средняя	Средняя

отсутствие четкой однозначной зависимости [3, 4, 6, 10, 11, 17].

Однако эта на первый взгляд противоречивая связь фосфатазной активности с содержанием минерального фосфора объясняется на основе регуляторной функции неорганического фосфора в биосинтезе фосфатаз микроорганизмами и корнями растений и активности почвенных ферментов, функционально не связанных с клеточным метаболизмом. На самом деле здесь противоречия не существуют, и характер взаимосвязи между фосфатазной активностью и содержанием минерального фосфора в почве в первую очередь определяется коли-

чеством последнего. Избыток подвижного фосфора подавляет синтез ферментов. В естественных условиях в формировании фосфатного потенциала почвы регулярное воздействие неорганического фосфора проявляется комплексно, действием как на ферментсинтезирующий аппарат микроорганизмов и корней, так и на активность почвенных ферментов. Можно предположить, что подвижный минеральный фосфор в почве является в некоторой степени регулятором интенсивности и направленности биохимических процессов мобилизации-иммобилизации почвенного фосфора. Следует иметь в виду, что к параметрам оптимумов экологических условий, определяющим фосфатную активность в различных почвах, следует причислить и такие показатели почвы, как влажность, рН, уровень экотоксикантов, биологические особенности возделываемой культуры. Так, результаты опыта 1998 г., которые характеризовались сходными тенденциями в направленности изученных метаболитов, существенно различались по количественным показателям фосфатной активности, содержания Фн, что дополнительно можно связать и с засушливыми условиями года и со значительно более вы-

сокой фосфатной активностью корневой системы возделываемой культуры (овса).

Заключение

Согласно полученным результатам, показатели ферментативной активности в системе почва — растение могут использоваться в качестве критерия для оценки экологической ситуации в агрофитоценозе. Отмеченное несоответствие между активностью АТФ-азы, НР, НИР и субстратами их действия объясняются существованием альтернативных путей метаболизма, ответственных за синтез субстратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамян С. А.* Ферментативная активность почв в зависимости от рН среды и состава обменных катионов. Автореф. канд. дисс. М. МГУ, 1980. — 2. *Баздырев Г. И.* Биологические показатели плодородия почвы склоновых земель при почвозащитных технологиях. — М: Изд. МСХА, 1987. — 3. *Бачгыо Н. Г., Асакнок Н. А.* Влияние различных способов обработки на урожайность сельскохозяйственных культур и биологическую активность почвы. — Пути повышения урожайности полевых культур. Минск: 1990, вып. 21. — 4. *Галстян А. Ш.* Об инактивации ферментов в почве. —

- Докл. АН Арм. ССР, 1963, т. 36, № 4, с. 225. — 5. *Галстян А. Ш.* Методы определения ферментативной активности почв. Ереван: Изд-во Айастан. — 6. *Звягинцев Д. Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки ее показателей. — Почвоведение, 1978, № 6. — 7. *Ильина Т. Н. и др.* Активность диссимиляционных внутриклеточных нитрат- и нитритредуктаз в почве. — Почвоведение, 1977, № 9. — 8. *Ларионов Г. А.* Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. — М.: МГУ, 1993. — 9. *Латыпова Р. М. и др.* Влияние гербицидов на биологическую активность почвы. — Сб.: Вопросы биологической активности почвы. Горки, 1968, т. 57, с. 61-70. — 10. *Масъко А. А., Потоцкая Л. А.* Изменение ферментной активности почвы при длительном применении пестицидов. — Биодинамика почв. Таллинн: 1988, с. 107-109. — 11. Методы почвенной микробиологии и биологии. М.: МГУ, 1991. — 12. *Моргун Л. В.* Биохимические показатели почв как индикаторы загрязненности их пестицидами. М.: 1980. — 13. *Пронина Н. Б.* Экологические стрессы (причины, физиолого-биохимические механизмы, классификация, тестирование). М.: МСХА, 2000. — 14. *Хазиев Ф. Х.* Основы системно-экологического анализа ферментативной активности почвы. — В кн.: Экологические условия и ферментативная активность почв. Уфа: 1979, с. 3-17. — 15. *Campbell N. E., Less H.* — Soil biochemistry. N.-Y. Ed. V. Dekker, 1967, p. 194-215. — 16. *Doran J. W.* — Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980, vol. 44, p. 765-771. — 17. *Ramirez Martinez J. R.* — Folia microbiologica, 1968, vol. 13, № 2, p. 161-169.

*Статья поступила
15 января 2002 г.*

SUMMARY

We have obtained the data evidencing the advantages of soil preserving technology. Enzymatic activity indices can be used as diagnosis criteria for environment evaluation during agrophytocenosis. Diphezone used as a herbicide is a combined wide-spectrum preparation, which doesn't influence negatively the agroecosystem if used as prescribed.