

УДК 631.417.2:631.445.24

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ КАК ФАКТОР ЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛОДОРОДИЯ

А. М. ЛЫКОВ, Н. Н. КЛИМЕНКО

(Кафедра земледелия и методики опытного дела)

В многофакторных микрополевых опытах установлена количественная зависимость производительности дерново-подзолистой почвы от уровня гумусированности, качественного состояния гумуса, возрастающих норм минеральных удобрений, мощности и уплотнения пахотного слоя почвы. Из всех факторов наибольшее влияние на урожайность культур оказывало содержание органического вещества в почве. Причем в опытах не установлен максимум продуктивности растений в зависимости от этого фактора.

Целенаправленное воздействие агротехническими приемами на почву с целью увеличения ее производительности возможно только после всестороннего изучения сложных количественных связей в системе агротехнический прием — почва — растение. Особый интерес представляет изучение количественных связей различных показателей почвенного плодородия и продуктивности растений с количественными и качественными характеристиками органического вещества почвы. Широкие возможности для изучения указанных связей дают многофакторные опыты [3, 4, 8]. Поэтому мы исследовали данную проблему в сложных микрополевых экспериментах в 1981—1983 гг. в учхозе Тимирязевской академии «Михайловское».

Методика

Вегетационно-полевые опыты проведены по специально разработанной схеме, принцип построения которой и статистический анализ результатов подробно описаны ранее [7, 9]. В опытах изучалось 5 факторов: культура (яровая пшеница, овес, ячмень, гороховая смесь); содержание углерода в почве (0,7; 1,4; 2,3; 4,0 %); нормы минеральных удобрений (0 — 60N80P60K; 1 — 120N160P120K; 2 — 180N240P180K; 3 — 240N320P240K); мощность пахотного слоя (0—40 и 0—20 см); уплотнение (без уплотнения и с уплотнением). Каждый из 128 вариантов опыта представлял собой сосуд без дна из армированной полиэтиленовой пленки, помещаемый в почву на поле. Высота сосуда 40 см, диаметр 25 см. Для опыта взяты четыре почвенных аналога с одного поля, на котором путем длительного внесения разных доз органических удобрений были созданы участки, сильно различающиеся по плодородию. Почву в сосуды набивали

после предварительного просеивания и известкования по двойной гидролитической кислотности. Исходные данные о свойствах почв опубликованы ранее [6]. Все операции с почвой в сосудах были аналогичны применяемым в полевых условиях, т. е. после уборки культур удалялись сорняки, весной моделировалась обработка ее рыхлением и уплотнением.

Качественное состояние органического вещества оценивалось по абсолютному и относительному содержанию углерода в водной и щелочной (0,1 н. NaOH) вытяжках и по коэффициенту цветности щелочной вытяжки.

Гидролитическую кислотность и $pH_{\text{СОЛ}}$ определяли в 1981 и 1982 гг. под горохово-овсяной смесью в период кушения, колошения и при уборке, в 1983 г. — в конце эксперимента под этой же смесью и пшеницей. В указанные сроки отбирали образцы почв для анализа на содержание NO_3 , P_2O_5 и K_2O . Методики аналитических исследований общеприняты.

Результаты

Исходные почвы различались по кислотным свойствам [6]. Как и следовало ожидать, благодаря известкованию по двойной гидролитической кислотности во время проведения эксперимента кислотность почв в период вегетации не выходила за пределы оптимальных значений для изучаемых культур — яровой пшеницы, ячменя, овса, викоов-

Таблица 1

Средние значения pH_{сод} за 1981—1983 гг. почвы под горохоовсяной смесью

Вариант удобрения	С в почве, %			
	0,7	1,4	2,3	4,0
0	6,28	6,52	6,74	6,64
1	6,42	6,53	6,67	6,61
2	6,26	6,44	6,70	6,55
3	6,09	6,39	6,60	6,51

сяной смеси (табл. 1). Это позволяет считать, что в данном опыте этот показатель не влиял на урожайность растений. Кислотность почвы несколько уменьшалась с увеличением содержания органического вещества в почве в увеличивалась с повышением норм минеральных удобрений.

Общий фон минерального питания растений был высоким (табл. 2) практически во всех вариантах, кроме варианта с самыми низкими содержанием углерода в почве и нормой минеральных удобрений. В сезонном цикле отмечена одинаковая для всех питательных веществ тенденция к уменьшению содержания от весны к осени. Причем для NO₃ она более выражена, чем для P₂O₅ и K₂O.

Расчет множественных количественных связей содержания элементов минерального питания в почве с изучаемыми факторами показал слабую адекватность производственных функций [6]. Значения парных коэффициентов корреляции (r) содержания питательных веществ в почве с изучаемыми факторами также невысокие. Даже корреляция их с нормами удобрений была слабой: значение r колебалось от 0,11 до 0,68. Объяснить это можно тем, что исходные почвы сильно различались по содержанию питательных веществ, особенно выделялась по этим показателям почва, содержащая 1,4 % С.

Благодаря высокому фону минерального питания во всех вариантах различия последних по нормам удобрений и содержанию элементов питания в почве практически не сказались на урожайности. Об этом говорят небольшие значения парных коэффициентов корреляции: в первом случае они колебались от —0,16 до 0,42, во втором — от —0,20 до 0,56. Отрицательные коэффициенты корреляции характерны для засушливого 1981 г., т. е. в этом случае при увеличении норм минеральных удобрений и содержания питательных веществ в почве урожайность культур снижалась.

Темпы накопления элементов питания в почвах в основном определялись исходным содержанием P₂O₅ и K₂O: чем оно было выше, тем быстрее шло их накопление. Однако в почве с 4,0 % С до закладки опыта содержалось значительно больше питательных веществ, чем в почве с 0,7 % С, но темпы накопления в первой были ниже. Этот факт можно объяснить не только большей емкостью необменного поглощения высокогумусированной почвы, но и лучшим использованием растениями питательных веществ минеральных удобрений (табл. 3).

Данные табл. 3 свидетельствуют о высокой связи урожайности культур и окупаемости минеральных удобрений урожаем с содержанием органического вещества в почве. Значения коэффициентов парной корреляции между содержанием углерода в почве и урожайностью

Таблица 2

Содержание питательных веществ в почвах (в среднем по трем срокам за 1981—1982 гг.)

Вариант удобрения	NO ₃ , мг/кг	P ₂ O ₅ мг/	K ₂ O 100 г
	0,7 % С		
0	19,7	9,7	16,9
1	23,1	14,1	19,3
2	36,9	17,2	22,0
3	43,6	22,4	24,9
1,4 % С			
0	21,0	40,7	35,2
1	28,4	45,8	40,8
2	46,0	54,2	44,1
3	65,5	59,6	49,1
2,3 % С			
0	27,5	35,5	32,4
1	34,3	38,4	34,5
2	45,7	44,3	36,4
3	60,1	50,1	38,2
4,0 % С			
0	27,9	26,7	29,3
1	38,4	29,9	31,2
2	43,2	33,2	32,7
3	59,6	36,6	33,9

Урожайность культур ($У$, г абсолютно сухого зерна на сосуд)
и окупаемость удобрений урожаем ($О$, г на 1 г удобрений)
в среднем за 1981—1983 гг.

С в поч- ве, %	Пшеница		Ячмень		Овес		Горохоовсяная смесь	
	У	О	У	О	У	О	У	О
0,7	11,6	5,7	20,4	10,1	20,7	10,5	56,3	27,3
1,4	14,7	7,4	22,2	11,2	25,1	12,3	57,3	30,5
2,3	19,4	10,0	28,2	14,2	31,6	15,8	67,3	34,8
4,0	24,1	12,2	34,4	16,7	36,5	18,2	71,7	37,2

культур колебались от 0,65 до 0,69 в засушливом 1981 г. и от 0,84 до 0,95 в благоприятные по метеорологическим условиям 1982 и 1983 гг.

Влияние содержания углерода ($Г$), подвижных форм элементов минерального питания растений в почве (NO_3 , P_2O_5) и нормы минеральных удобрений ($Д$) на урожайность культур ($У$) показывают следующие уравнения регрессии:

1981 г.

$$\begin{aligned} \text{Ячмень } У &= 16,35 + 3,28Г - 0,73Д + 0,02NO_3 - 0,01 P_2O_5, R=0,71; \\ \text{Пшеница } У &= 9,50 + 2,02Г - 0,04NO_3 + 0,01 P_2O_5, R=0,73. \end{aligned}$$

1982 г.

$$\begin{aligned} \text{Ячмень } У &= 16,60 + 4,64Г + 1,84Д, R=0,94; \\ \text{Пшеница } У &= 7,75 + 4,57Г + 1,14Д, R=0,97. \end{aligned}$$

1983 г.

$$\text{Пшеница } У = 6,16 + 4,39Г + 2,00Д, R=0,91.$$

Представление о количественном вкладе изучаемых факторов в формирование урожая дают значения их эффектов. В табл. 4 приведены соответствующие данные по ячменю за 1983 г.; данные за предшествующие два года опубликованы в работе [6]. Для остальных зерновых культур они подобны.

Эффекты от содержания органического вещества почвы были наибольшими по абсолютной величине и практически все оказались статистически значимыми. Эффекты от норм минеральных удобрений по абсолютной величине значительно уступали эффектам от гумусированно-

Таблица 4

Главные эффекты изучаемых факторов для ячменя в 1983 г.
(урожайность, г на сосуд)

Вариант		Средний урожай	Главный эффект от			
С в почве, %	норма удобрения		С почвы	нормы удобрения	мощности пахотного слоя	уплотнения
0,7—1,4	0—1	20,00	2,73	1,78	—1,38	—1,87
0,7—1,4	2—3	26,48	1,04	0,94	—0,31*	0,29*
0,7—2,3	0—2	25,64	3,31	4,84	0,36*	—1,14*
0,7—2,3	1—3	27,20	4,46	1,84	0,29*	0,36*
0,7—4,0	1—2	31,71	7,89	0,11*	—0,59*	—0,59*
0,7—4,0	0—3	32,25	10,92	2,65	—0,08*	—0,08*
1,4—2,3	1—2	33,80	3,09	0,56*	—0,11*	0,11*
1,4—2,3	0—3	26,40	2,08	5,69	—0,06*	—0,06*
1,4—4,0	0—2	30,18	8,82	0,65	—0,73*	0,40*
1,4—4,0	1—3	36,54	7,44	1,64	—0,71*	—1,04*
2,3—4,0	0—1	33,38	7,53	1,88	—1,10	0,50*
2,3—4,0	2—3	33,07	3,56	1,86	0,74*	0,41*

* — эффект статистически недостоверен на уровне значимости 0,5.

сти почвы, причем в неблагоприятном по метеорологическим условиям 1981 г. число значимых эффектов не превышало 50 %, а в благоприятных таких эффектов было большинство.

Во все годы исследований мощность пахотного слоя почвы и различное ее уплотнение не оказали статистически достоверного влияния на урожайность культур. Исключением оказались малогумусированные почвы, уплотнение и увеличение мощности пахотного слоя которых привели к существенному снижению урожайности ячменя, хотя и не сказались на урожайности других зерновых культур. Все это свидетельствует о том, что при высоком содержании питательных веществ и достаточном количестве органического вещества в почве уплотнение и углубление пахотного слоя до 0—40 см не оказались эффективными факторами повышения урожайности.

Нами был проведен анализ семейств кривых, построенных по производственным функциям. Например, для пшеницы в 1981 г. и ячменя в 1982 г. соответствующие уравнения имели вид:

$$Y=5,3+8,1Г^{0,5}-1,4(ГД)^{0,5}+1,2 ДУ, R=0,74;$$
$$Y=-2,2+27,8Г^{0,5}+3,2Д^{0,5}, R=0,97,$$

где $ДУ$ и $ГД$ — соответствующие взаимодействия эффектов. Этот анализ позволил установить, что в изучаемом интервале содержания органического вещества в почве не был достигнут максимум продуктивности культур. В то же время полученные данные полностью подтвердили приведенную выше количественную оценку изучаемых факторов.

Результаты исследований показали также, что урожайность зерновых культур тесно связана не только с содержанием органического вещества в почве, но и с его качественным состоянием. Так, получены достаточно высокие значения парных коэффициентов корреляции урожайности с содержанием углерода в вытяжках. Например, r между содержанием углерода в щелочной вытяжке и урожайностью пшеницы в 1981 г. был равен 0,46, в 1982 и 1983 гг. — 0,78; r между содержанием углерода в водной вытяжке и урожаем ячменя в 1981 и 1982 гг. соответственно 0,66 и 0,83.

Выявлена высокая количественная связь урожайности культур с биологическими свойствами почвы. Так, значения коэффициентов корреляции между урожайностью, например, пшеницы в 1982 г. и выделением почвой CO_2 по срокам вегетации составили 0,56, 0,52 и 0,76. Здесь следует отметить, что значение самих биологических показателей во многом определяется наличием органического вещества в почве:

r между содержанием углерода в почве, с одной стороны, и активностью каталазы, выделением почвой CO_2 , поглощением почвой O_2 , с другой, были равны соответственно 0,82—0,89, 0,72—0,77 и 0,81—0,90.

Количественно связь выделения почвой CO_2 и поглощения O_2 с содержанием углерода в почве и относительным содержанием углерода в щелочной вытяжке ($\mu\%$) описывалась, например, для пшеницы в 1982 г. следующими уравнениями регрессии:

$$O_2=1,141+0,034\mu\%+1,074 Г, R=0,82;$$
$$CO_2=0,944+0,196\mu\%+1,811 Г, R=0,69.$$

Считается, что дыхательный коэффициент свидетельствует об уровне метаболизма органического вещества [1, 2]. В нашем эксперименте увеличение гумусированности почвы сопровождалось уменьшением дыхательного коэффициента. Так, для почв с содержанием углерода 0,7; 1,4; 2,3 и 4,0 % его значения соответственно составляли 1,46, 1,06, 0,99 и 0,92. Это в определенной мере указывает на большую устойчивость органического вещества высокогумусированных почв. Сам дыхательный коэффициент в меньшей степени, чем выделение CO_2 и поглощение O_2 , количественно связан с содержанием органического вещества в почве. Об этом говорят меньшие значения коэффициентов корреляции, например, для пшеницы в 1982 г.: по срокам соответственно —0,36;

Дыхание почвы (мкл/г·ч) под пшеницей в среднем по 3 срокам и всем почвам в 1982 г. под пшеницей

Норма удобрений	Выделение CO ₂	Поглощение O ₂	Дыхательный коэффициент
0	3,43	3,54	1,06
1	3,88	3,86	1,06
2	3,68	3,69	1,10
3	4,24	3,71	1,20

—0,59; —0,57. Интересно также отметить, что с увеличением гумусированности почвы абсолютные изменения значений указанных выше биологических показателей по срокам вегетации уменьшались. Последнее также свидетельствует о большой стабильности биологических процессов в почвах с высоким содержанием органического вещества.

Внесение возрастающих норм минеральных удобрений приводило к увеличению биологической активности почвы в среднем по всем экс-

периментам (табл. 5). Однако действие их было неравнозначно в разные периоды вегетации. При очень больших нормах (240N320P240K), несмотря на более высокий уровень биологической активности, к концу вегетации отмечалось более резкое уменьшение показателей биологической активности (в т. ч. нитрифицирующей способности почвы). Это, по-видимому, связано с отрицательным влиянием высокой концентрации почвенного раствора и его подкисления на почвенную микрофлору [5].

С агрономической точки зрения интерес представляет не только абсолютная биологическая активность почвы, но и относительная (на единицу углерода), т. е. биогенность почвы. В нашем опыте биогенность почвы (а значит, и напряженность биологических процессов [1]) уменьшалась с увеличением содержания в почве органического вещества (табл. 6). Коэффициенты корреляции между гумусированностью почвы и биогенностью по каталазе колебались от —0,70 до —0,84.

Биогенность почвы количественно тесно связана не только с содержанием органического вещества, но и с его качественным состоянием. Парные коэффициенты корреляции между биогенностью почвы по каталазе, с одной стороны, и подвижностью водорастворимого и щелочерастворимого углерода, с другой, составили в среднем соответственно 0,89 и 0,73. Подвижность органического вещества почвы (относительное содержание углерода в вытяжках) в значительной мере может характеризовать прочность органо-минеральных связей, поэтому изменения напряженности биологических процессов в почве и прочности органо-минеральных связей должны иметь одинаковую направленность. С указанными свойствами органического вещества количественно тесно связана его продуктивность (выход продукции на единицу углерода почвы), которая, как отмечалось ранее [6], уменьшается с увеличением гумусированности почвы. Парные коэффициенты корреляции между биогенностью почвы и продуктивностью органического вещества находились в пределах 0,79—0,94.

Продуктивность органического вещества во многом зависела и от его качественного состояния. Установлена высокая положительная связь этого показателя с подвижностью органического вещества. Зна-

Таблица 6

Биогенность почвы под пшеницей в среднем по 3 срокам определения в 1982 г.

Биогенность	С в почве, %			4,0
	0,7	1,4	2,3	
По каталазе *, мкл/мин	5,60	1,90	1,61	1,05
По поглощению O ₂ , мкл/г·ч	3,29	2,18	1,56	1,47
По выделению CO ₂ , мкл/г·ч	4,64	2,26	1,50	1,35
По нитрифицирующей способности NO ₃ , мг/кг почвы	31,2	18,8	12,2	7,6

* Все показатели рассчитаны на 0,1 % С.

чения парных коэффициентов корреляции в разные годы под разными культурами составляли 0,76—0,95. Количественная сторона этих связей характеризуется следующими уравнениями регрессии:

$$P=0,836-0,175\Gamma+3,038\text{ в}\%, R=0,95;$$

$$P=0,848-0,099\Gamma+0,047\text{ щ}\%, R=0,97,$$

где P — продуктивность органического вещества, г зерна на сосуд на 0,1% С; $\text{в}\%$ и $\text{щ}\%$ — относительное содержание углерода соответственно в водной и щелочной вытяжках.

Наличие существенных корреляционных связей показателей органического вещества со свойствами почвы, ее продуктивностью и урожайностью культур указывает на важную роль в плодородии дерново-подзолистой почвы не только количества органического вещества, но и его качественного состояния. Поэтому представляет особый интерес изучить влияние различных агротехнических приемов на качественное состояние органического вещества.

В вариантах с наиболее высокими нормами минеральных удобрений абсолютное содержание углерода в щелочной вытяжке в среднем за 1981—1982 гг. по 3 срокам определения было на 130 мг/кг больше, чем в вариантах с менее высокими их нормами. Относительное его содержание составляло соответственно 9,11 и 8,26 %.

Количественная зависимость абсолютного содержания углерода в щелочной (щ) и водной (в) вытяжках от содержания органического вещества в почве (под ячменем и пшеницей) и норм минеральных удобрений выражается следующими уравнениями регрессии:

$$\text{в}=40,94+13,55\Gamma+0,39D, R=0,92;$$

$$\text{щ}=805,9+233,2\Gamma+45,2D, R=0,82.$$

Уменьшающиеся значения коэффициента цветности щелочной вытяжки с увеличением норм минеральных удобрений указывают на то, что в подвижном органическом веществе происходят не только количественные, но и качественные изменения, приводящие к утрате алифатических структур.

Уплотнение в среднем за 2 года по всем вариантам не влияло на содержание подвижного органического вещества, но при этом обычно наблюдаемое от весны к осени уменьшение последнего проявлялось слабее.

Тенденция к снижению качества лабильного органического вещества (водно- и щелочнорастворимого) от весны к осени отмечалась для всех почв в 1981 и 1982 гг. Возрастающий при этом коэффициент цветности щелочной вытяжки указывает на то, что в ней увеличивалась доля алифатических структур, что, в свою очередь, свидетельствует об упрощении химических структурных компонентов.

За 3 года исследований в результате интенсивного использования почв (ежегодное тщательное рыхление на 0—20 см весной перед посе-

Т а б л и ц а 7

Показатели состояния органического вещества в конце опыта (1983 г.)

Показатель	Горохоовсяная смесь j				Пшеница			
	С в почве. %							
	0,7	1,4	2,3	4,0	0,7	1,4	2,3	4,0
С в щелочной вытяжке:								
мг/кг	710	860	1007	1440	575	634	717	1070
%	12,0	6,8	4,7	3,9	8,5	5,5	3,6	3,1
Коэффициент цветности	7,07	5,99	6,38	4,92	3,52	3,79	3,80	4,33
С в водной вытяжке:								
мг/кг	53	55	76	102	46	47	60	74
%	0,80	0,43	0,35	0,27	0,67	0,40	0,29	0,21

вом, внесение высоких норм минеральных удобрений, трехлетнее выращивание культур в одних и тех же сосудах) наряду с уменьшением общего содержания органического вещества в почве произошло резкое сокращение его лабильных фракций (табл. 7).

Исходные почвы, содержащие 0,7; 1,4; 2,3; 4,0 % С, характеризовались соответственно следующим качественным состоянием органического вещества: абсолютное содержание углерода в щелочной вытяжке соответственно 1531; 1205; 1545 и 2233 мг/кг, относительное — 21,9, 8,6, 6,7 и 5,6 %; коэффициент цветности — 4,71, 5,56, 5,16 и 4,79; абсолютное содержание углерода в водной вытяжке — 81, 101, 158, 164 мг/кг, относительное — 1,16, 0,72, 0,69 и 0,41 %.

Данные табл. 7 свидетельствуют о том, что различные культуры неодинаково влияли на качественное состояние органического вещества. Под пшеницей произошло намного большее сокращение лабильных фракций и подвижности органического вещества, чем под горохо-овсяной смесью. Уменьшение значений коэффициента цветности под пшеницей к концу опыта говорит о том, что выращивание этой культуры привело к потере алифатических структур в щелочной вытяжке. Под горохоовсяной смесью, наоборот, наблюдалось обогащение щелочных вытяжек алифатическими структурами. Разное влияние культур на качественное состояние органического вещества объясняется скорее всего различием в количестве и качестве растительных остатков, остающихся в почве после этих культур.

Выводы

1. В условиях проведения эксперимента из всех изучаемых факторов содержание органического вещества в почве оказывало наибольшее влияние на урожайность культур, при этом в данном интервале гумусированности почвы не установлен максимум продуктивности растений. Урожайность культур связана также и с качественным состоянием органического вещества почвы.

2. Показатели качественного состояния органического вещества тесно коррелируют с показателями биологических свойств почвы. Продуктивность органического вещества (урожай на единицу углерода) находится в прямой зависимости от его подвижности.

3. При высокой обеспеченности растений питательными веществами в слое почвы 0—20 см не обнаружено преимуществ углубления пахотного слоя до 0—40 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боинчан Б. П. Процессы трансформации органического вещества в интенсивно используемой дерново-подзолистой почве и продуктивность полевых культур — Автореф. канд. дис. М., 1982. — 2. Гэлстон А., Девис П., Сэттер Р. Жизнь зеленого растения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 3. Доспехов Б. А. Повышение информативности и комплексности научных разработок. — Вестн. с.-х. науки, 1979, № 1, с. 96—101. — 4. Дэннел К. Применение статистики в промышленном эксперименте. — М.: Мир, 1979. — 5. Карягина Л. А. Микробиологические основы повышения плодородия почв. — Минск: Наука и техника, 1983. — 6. Лыков А. М., Рубанов И. А., Клименко Н. Н. Агрономическая оценка моделей плодородия дерново-подзолистой почвы. — Изв. ТСХА, 1983, вып. 6, с. 35—42. — 7. Лыков А. М., Рубанов И. А., Клименко Н. Н. Моделирование плодородия почвы в микрополевоом опыте. — Изв. ТСХА, 1984, вып. 2, с. 27—32. — 8. Максимов В. Н. Многофакторный эксперимент в биологии. — М.: Изд-во МГУ, 1980. — 9. Рубанов И. А., Лыков А. М., Клименко Н. Н. Основные принципы планирования и построения ортогональных схем главных эффектов факторов. — Изв. ТСХА, 1983, вып. 3, с. 43—48.

Статья поступила 21 апреля 1986 г.

SUMMARY

In multiple-factor micro-field experiments, quantitative correlation between soddy-podzolic soil productivity and its humusness, quality of the humus, increasing rates of fertilizers, and plow-layer density has been found. Of all the factors, the amount of organic matter in the soil produced the greatest effect on crop yield, the maximum plant productivity connected with this factor being not determined.