

УДК 633.2"3:631.582

РОЛЬ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР В СТАБИЛИЗАЦИИ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Н.В. ПАРАХИН, И.В. КОБОЗЕВ, Г.С. МАРКИН

(Кафедра луговодства)

В работе приведены 12-летние данные по оценке стабильности урожайности разных культур, выращиваемых в монокультуре и в севообороте. Показана экологическая и энергетическая вредоносность «развала» севооборотов.

В ряде работ [2—6] нами рассматривались вопросы энергетической эффективности агроэкосистем в кормопроизводстве и было показано, что любая техногенная деятельность связана с расходом и потерей энергии системой в пространстве. Однако в растениеводстве с помощью антропогенных факторов можно увеличить ассимиляцию солнечной энергии растениями. При этом важно добиться того, чтобы затраты техногенной энергии E_T окупались прибавкой энергии в урожае и, более того, компенсировали экологические последствия (например, изменение плодородия почвы), оцениваемые через энергетический эквивалент.

Только в том случае можно говорить об экологически безопасном производстве, если коэффициент энергетической его эффективности будет больше 2, т.е. если прибавка энергии в агроэкосистеме

за счет интенсификации фотосинтеза (продукционного процесса) будет минимум в 2 раза больше техногенных энергетических затрат.

При решении практических задач в сельском хозяйстве для определения баланса энергии и вещества в системе антропогенный фактор — почва — растение — урожай можно принять упрощенную формулу:

$$\Delta E = \Delta E_{\phi} + \Delta E_n - E_T = (E_{\phi,к} - E_{\phi,н}) + (E_{n,к} - E_{n,н}) - E_T, \quad (1)$$

где ΔE — баланс или прибавка энергии (вещества) в указанной системе; ΔE_{ϕ} — прибавка энергии за счет увеличения урожая; ΔE_n — энергетическая оценка изменения плодородия почвы; E_T — затраты энергии на выращивание урожая; $E_{\phi,н}$ и $E_{\phi,к}$ — начальный и конечный выход энергии (вещества) с урожаем; $E_{n,н}$ и $E_{n,к}$ — начальное и конечное содержа-

ние энергии (вещества) в почве [1, 2].

На основании таких расчетов и экспериментов нами определен баланс энергии N, P, K и гумуса при возделывании разных культур в севообороте, укороченных плодосменах и монокультуре. Наиболее четкие закономерности в изменении баланса энергии и вещества выявлены в полевом опыте, проведенном в 1984—1995 гг. (2 ротации — 1984—

1989 гг. и 1990—1995 гг.) в ГПЗ «Заря Подмосковья» Домодедовского района Московской области. Опыт заложен на тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве, содержание гумуса в слое 0—25 см — 2,3%, рН — 6,0, подвижного P₂O₅ по Кирсанову — 14 мг, K₂O по Масловой — 15 мг в 100 г. Схема опыта представлена в табл. 1. В 1984 и 1989 гг. в вариантах с удобрением проводилось известкование из расчета 6 т/га.

Таблица 1

Схема полевого опыта по изучению эффективности возделывания разных культур в севообороте и в бессменных посевах в ГПЗ «Заря Подмосковья»

Культура	Севооборот				Бессменные посевы			
	без удоб- рений	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	без удоб- рений	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Яр. ячмень на монокорм с подсевом клевера + ти- мофеевки	—	68	147	160	—	68	147	160
Травы 1-го г.п.	—	0	120	150	—	0	120	150
Травы 2-го г.п.	—	138	196	150	—	138	126	150
Оз.пшеница (солома запа- хивается)	—	155	147	160	—	155	147	160
Кукуруза на сплос	—	168	147	150	—	168	147	150
Оз.рожь на зе- леный корм и вика + овес	—	138	126	150	—	138	126	150

Результаты опыта полностью подтвердили теоретически обоснованное [1] энергетическое преимущество сложных мозаичных систем с замкнутым биогеохимическим циклом, каким является севооборот с внесением удобрений. При этом экспериментально доказано, что любой элемент в системе действует энергетически эффективнее, чем в отдельности,

т.е. урожайность любой культуры в севообороте и больше, и стабильнее, чем в бессменных посевах. Кроме того, севооборот позволяет снизить затраты антропогенной энергии. Согласно физико-математическим расчетам это снижение затрат равно:

$$\begin{aligned} (h + 1)(b - 1) E_{т.общ} &= \\ &= 2(b - 1) = E_{т.общ} \end{aligned} \quad (2)$$

где h — коэффициент трудности ликвидации экологических последствий антропогенной деятельности; b — количество элементов (культур) в севообороте; $E_{т.обл}$ — энергия, подводимая ко всем элементам независимо от того, действуют они в системе или в разрозненном состоянии (монокультура). В севообороте техника и другие ресурсы используются полнее и эффективнее, чем при возделывании одной культуры.

Исследования [1, 2] показали, что с увеличением экологических или экономических трудностей (h) увеличивается и вред от развала мозаичной функционально замкнутой системы, повышаются

энергетические затраты на получение такой же продуктивности, как до ее разрушения на отдельные элементы. Однако, чем выше энергетические затраты, тем ниже коэффициент их окупаемости (η) и больше коэффициент экологических последствий (h). Поэтому монокультура рано или поздно приводит к полной деградации растениеводства и разрушению агроэкосистем. Особенно вредна монокультура при экстенсивном ведении хозяйства, в том числе без внесения удобрений. Все это и подтвердили полевые исследования, да и производственная деятельность крупных и фермерских хозяйств (табл. 2 и 3).

Т а б л и ц а 2

Среднегодовая продуктивность (корм.ед/га) сельскохозяйственных культур, возделываемых в севообороте и бессменных посевах, при внесении удобрений и без них за 1-ю (числитель) и 2-ю ротации (знаменатель)

Культура	Севооборот		Бессменные посевы	
	без удобрений	НРК	без удобрений	НРК
Яр.ячмень на монокорм с подсевом трав	<u>4850</u>	<u>6970</u>	<u>4050</u>	<u>3800</u>
	4040	6850	3100	5450
Травы 1-го г.п.	<u>4940</u>	<u>7100</u>	—	—
	4680	7240	—	—
Травы 2-го г.п. и последующих лет	<u>4740</u>	<u>7340</u>	<u>3830</u>	<u>7200</u>
	4590	7200	3530	7050
Оз.пшеница	<u>3100</u>	<u>4400</u>	<u>2840</u>	<u>3400</u>
	2860	4490	1850	2480
Кукуруза на силос	<u>4480</u>	<u>6950</u>	<u>4080</u>	<u>6840</u>
	3050	7340	2690	6800
Оз.рожь на зеленый корм и вика + овес	<u>4940</u>	<u>6840</u>	<u>4850</u>	<u>6950</u>
	4130	6960	4040	6650
В среднем	<u>4508</u>	<u>6600</u>	<u>3930</u>	<u>6218</u>
	3892	6680	3042	5686

Среднегодовой баланс энергии при возделывании культур в бессменных посевах и севообороте без применения удобрений (числитель) и с их внесением (знаменатель) за 1-ю и 2-ю ротацию (условно 1 и 2) без учета изменения плодородия почвы

Показатель	Севооборот		Бессменные посевы										в среднем	
			ячменя на монокорм		многолетних трав		оз.пшеницы		кукурузы на силос		однолетних трав			
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
E_{ϕ} — сбор с урожая обменном энергии (ОЭ), ГДж/га	74,6	65,3	70,7	61,9	68,8	66,0	59,2	47,8	71,1	57,6	77,4	70,6	69,4	60,8
	90,3	90,8	84,6	82,0	94,3	93,2	72,9	53,3	91,9	91,6	92,6	90,6	87,3	82,5
ΔE_{ϕ} — прибавка сбора ОЭ от удобрений, ГДж/га	15,7	25,5	13,9	20,1	25,5	27,2	13,7	5,5	20,8	34,0	5,2	20,0	17,9	21,7
ΔE ($\Delta E = E_{\phi} - E_1$) — видная прибавка ОЭ с урожаем, ГДж/га	57,1	47,8	47,4	38,6	53,8	51,0	33,8	22,4	39,4	26,5	43,8	37,0	43,7	35,1
	60,7	61,2	50,2	47,6	67,6	66,5	28,7	11,1	42,1	41,8	43,8	41,8	46,5	41,7
$(\eta = E_{\phi} : E_1)$ — коэффи- циент энергетической	426	373	308	266	459	440	233	188	228	185	230	210	270	270
эффективности про- изводства, %	305	307	246	238	353	349	165	125	185	184	205	186	214	202

Данные табл. 2—5 свидетельствуют, что в среднем за 12 лет энергетическая продуктивность сельскохозяйственных растений в монокультуре без удобрений была на 10%, а при их внесении на 6% меньше, чем в севообороте. При этом устойчивость к монокультуре особенно низкая у озимой пшеницы, а без внесения удобрений — и у кукурузы на силос (табл. 3). Следует учесть, что в полевом опыте не выявляются отрицательные стороны монокультуры, поскольку в вариантах монокультуры и севооборота не допускается развитие болезней и вредителей, т.е. фитосанитарное состояние делянок в том и другом случае практически одинаковое. Более того, ежегодно высевается оздоравливаемый материал. Вместе с тем наблюдения за производственными посевами показали, что зерновыс по зерновым сеять даже 2 года нежелательно. На 3-й год имеют место сильное развитие корневых гнилей, твердой и пыльной головни, ржавчины и огромная поражаемость клопом-черепашкой. Если к тому же высевается собственный семенной материал, то урожайность на 3-й год падает почти в 3 раза, а зерно становится непродовольственным.

Анализируя результаты полевого опыта, можно убедиться, что внесение удобрений несколько снимает отрицательные последствия монокультуры (табл. 2). Наиболее терпимы к монокультуре многолетние травостой, а также однолетние (блок озимая рожь на зеленый корм; викоовсяная смесь), которые характеризуются определенной мозаичностью. При внесе-

нии удобрений кукуруза на силос также обладает высокой устойчивостью к монокультуре. Тем не менее во всех случаях продуктивность даже этих культур во 2-ю ротацию опыта была ниже, чем в 1-ю, особенно в вариантах без внесения удобрений. Продуктивность всего севооборота, хотя и в меньшей степени, чем набор таких же культур в бессменных посевах, тоже уменьшалась без внесения удобрений (на 13,6%). В севообороте без внесения удобрений особенно резко снизилась урожайность кукурузы на силос: во 2-ю ротацию — на 32%. Продуктивность ячменя на монокорм уменьшилась на 17%, а однолетних трав — на 16%. Средняя урожайность многолетних трав во 2-ю ротацию даже без внесения удобрений уменьшилась всего на 3—5%. Это еще раз подтверждает, что многолетние травы являются мощным фактором стабилизации деятельности агроэкосистем, особенно при отсутствии ресурсов на интенсификацию сельского хозяйства.

При внесении удобрений продуктивность культур, возделываемых в севообороте, по ротациям стабилизировалась и даже несколько повышалась. То же самое можно отметить и по всему севообороту в целом (табл. 2, 3). Это свидетельствует о том, что за счет севооборота и внесения удобрений можно не только обеспечить замкнутость биогеохимического цикла, но и его расширение и ускорение.

Анализ данных табл. 3 показал, что со временем эффективность удобрений увеличивалась, осо-

бенно в севообороте. Это объясняется как последствием удобрений, так и тем, что в контроле (без удобрений) урожайность постепенно уменьшалась, а при внесении NPK, особенно в севообороте, она стабилизировалась. Более слабое действие удобрений в бессменных посевах (за исключением кукурузы и трав) вызвано «порчей местообитания», которая не нейтрализуется из-за отсутствия последующих культур. В производственных условиях эта порча вызвана в основном развитием болезней, вредителей, сорняков. Мы не склонны преувеличивать роль корневых выделений, поскольку они являются питательной средой для ризосферных микроорганизмов и при достаточном увлажнении быстро нейтрализуются. Гораздо большее значение имеют продукты разложения органических остатков. Это, возможно, и явилось одной из причин того, что даже при внесении NPK продуктивность и энергетическая эффективность посевов озимой пшеницы при возделывании в бессменных посевах с запариванием соломы резко падала (табл. 3).

Наиболее отзывчивыми на внесение удобрений были кукуруза на силос и многолетние травы. Причем прибавка от удобрений в севообороте у каждой культуры была выше, чем в бессменном посеве (табл. 2, 3). Это еще раз свидетельствует о том, что севооборот является важнейшим средством уменьшения потери энергии и вещества агроэкосистемами, усиления ассимиляционных процессов и повышения эффективнос-

ти техногенных факторов их интенсификации. В севообороте обеспечивается более надежное и стабильное действие антропогенных факторов, в том числе удобрений (табл. 3). Более того, их эффективность со временем увеличивается.

Энергетическая эффективность, т.е. видная прибавка энергии в системе с учетом энергетических затрат на производство, была более стабильной в севообороте. Снижение этого показателя в севообороте от 1-й ротации ко 2-й было в 2,94 раза меньше, чем по набору культур в бессменных посевах. Энергетическая эффективность севооборота по сравнению с бессменными посевами повышается со временем. Если в 1-й ротации за счет севооборота энергетическая прибавка агроэкосистем в среднем за год по сравнению с набором монокультур была в 1,31 раза больше, то во 2-й — уже в 1,36 раза. При внесении удобрений за счет севооборота дополнительно энергетическая прибавка в 1-ю ротацию увеличивалась ежегодно на 18,5 ГДж/га, а во 2-ю — на 19,5 ГДж/га (табл. 3). Рост разницы в энергетической эффективности производства при севооборотах и бессменных посевах в пользу первых объясняется тем, что в первом случае достигается стабилизация и даже улучшение использования растениями всех факторов их произрастания, а во втором имеет место постепенная деградация агроэкосистемы. Упрощение экосистемы вызывает снижение ее устойчивости к отрицательным экзогенным факторам. Более того, упрощение струк-

туры продуцирующей части фитоценозов сопровождается усложнением и повышением активности патогенной микрофлоры и вредоносной микрофауны. Даже в полевых опытах на делянках с постоянным возделыванием культур увеличивается их поражаемость болезнями, что особенно ярко выражено при бессменном выращивании зерновых.

Исследования показали, что энергетическая прибавка в севообороте без удобрений уменьшалась от ротации к ротации на 19,5%, а по набору культур в бессменных посевах — на 24,5% (табл. 3). При внесении удобрений в первом случае обеспечивался даже небольшой рост показателя, а в последнем — его снижение (на 11,5%). Без внесения удобрений особенно резкое снижение энергетического дохода отмечается в бессменных посевах озимой пшеницы, кукурузы и ячменя на монокультурном, менее резкое — у многолетних трав. Удобрение хотя и стабилизирует энергетический доход в бессменных посевах, особенно при возделывании кукурузы, однолетних трав и ячменя на монокультурном, но не снимает в полной мере отрицательного последствия бессменных посевов. Более того, снижение во времени энергетической эффективности бессменного возделывания озимой пшеницы на зерно с запахиванием соломы при внесении удобрений в 3 раза больше, чем без их применения. Это свидетельствует о том, что в бессменном посеве зерновых эффективность удобрений постепенно падает, а отрицательное его влияние, в час-

тности, при возделывании озимой пшеницы возрастает. Поэтому ориентация на узкую специализацию, если она сопровождается переходом на монокультуру, связана с опасностью полной деградации сельскохозяйственного производства, особенно в условиях дефицита удобрений, техники, химических средств защиты растений от болезней, вредителей, сорняков. В таких условиях возрастает роль многолетних трав и бобовых культур.

Как уже говорилось выше, важнейшим и, пожалуй, основным показателем экологической безопасности производства является коэффициент η его энергетической эффективности. Чем выше его значение, тем больше вероятность уменьшения экологических последствий антропогенной деятельности. При $\eta \geq 2$ можно условно говорить об экологически безвредном производстве.

Исследования показали, что коэффициент энергетической эффективности растениеводческой продукции даже без учета изменения плодородия почвы в среднем за 12 лет был в 1,53 раза выше, чем по набору культур в бессменных посевах. Важно отметить, что при внесении удобрений значение этого показателя для севооборота уменьшается от ротации к ротации в меньшей степени, чем для набора культур в бессменных посевах (табл. 3). Данный вопрос следует рассмотреть подробнее по культурам. Без внесения удобрений наиболее высокий коэффициент энергетической эффективности отмечен при возделывании многолетних трав и ячменя на

монокорм (табл. 3, 4). При этом у данных культур и однолетних трав даже во 2-ю ротацию его значение оставалось больше 2, уменьшаясь соответственно у многолетних травостоев на 4,3%, однолетних трав — на 9,5, ячменя — на 13,9%. У озимой пшеницы и кукурузы на силос оно снизилось соответственно на 23,9 и 23,2% (табл. 3). В результате во 2-ю ро-

тацию в вариантах без удобрений коэффициент энергетической эффективности бесменного возделывания озимой пшеницы и кукурузы в период с 1989 до 1995 г. стал меньше 2, что свидетельствует о росте отрицательных экологических последствий производства, возможности выхода системы за пределы экологической безопасности.

Т а б л и ц а 4

Баланс гумуса, энергии, общего азота, подвижного P_2O_5 , обменного K_2O в почве севооборота и бесменных посевов в зависимости от удобрений (за 12 лет) в вариантах без удобрений (числитель) и с NPK (знаменатель)

Культура	Гумус, %	$N_{обм}$, кг/га	P_2O_5 , кг/га	K_2O , кг/га	Энергия, ГДж/га
Ячмень на монокорм	<u>-0,080</u>	<u>-348</u>	<u>-96</u>	<u>-168</u>	<u>-133,2</u>
	0,090	60	132	240	103,2
Многолетние травы	<u>0,320</u>	<u>360</u>	<u>-60</u>	<u>-156</u>	<u>393,6</u>
	0,520	276	96	60	643,6
Оз.пшеница	<u>0,005</u>	<u>-132</u>	<u>-84</u>	<u>-120</u>	<u>-19,2</u>
	-0,036	264	192	276	-3,6
Кукуруза на силос	<u>-0,420</u>	<u>-384</u>	<u>-192</u>	<u>-252</u>	<u>-543,6</u>
	-0,385	108	60	108	-416,4
Оз.рожь на зеленый корм + викоовсяная смесь	<u>0,030</u>	<u>144</u>	<u>-96</u>	<u>-108</u>	<u>44,4</u>
	0,090	132	48	120	138,0
В среднем по бесменным посевам	<u>-0,029</u>	<u>-720</u>	<u>-86</u>	<u>-141</u>	<u>-51,6</u>
	0,056	204	106	161	92,9
По севообороту	<u>0,004</u>	<u>-144</u>	<u>-60</u>	<u>-120</u>	<u>-19,2</u>
	0,080	168	120	192	115,2

При внесении удобрений увеличивается прибавка энергии в агроэкосистемах, но снижается коэффициент энергетической окупаемости производства, что подтверждает общезвестную закономерность, отмеченную и объясненную подробно нами в работах [3, 4]. Вместе с тем при внесении

удобрений значение коэффициента энергетической эффективности снижается от ротации к ротации в меньшей степени, чем без их применения, а в севообороте даже наблюдаются его стабилизация и рост. Однако в отдельных случаях, например, при бесменном возделывании озимой пшеницы на

зерно, внесение удобрений ускоряет снижение коэффициента энергетической эффективности производства (в нашем примере — в 1,34 раза), т.е. резко возрастает опасность отрицательных экологических последствий. Как правило, для получения одинаковой прибавки энергии в монокультуре требуются большие энергетические затраты, чем в севообороте. Однако, как отмечалось выше, чем больше дозы антропогенного фактора, тем меньше его эффективность, а чем ниже последняя, тем сильнее отрицательное влияние монокультуры на продукционный процесс в агроэкосистемах. Таким образом, наступает цепная реакция снижения энергетической эффективности последнего и разрушения агроэкосистем.

Выше рассмотрен только видный баланс энергии, получаемый в системе антропогенный фактор — урожай, т.е. без учета изменения плодородия почвы. Для выяснения роли каждой отдельной культуры в стабилизации продукционного процесса в севообороте нами был определен баланс энергии гумуса, N, P, K в почве в зависимости от удобрения, вида культуры и севооборота за 12 лет (табл. 4).

Результаты исследований показали, что многолетние травы (клеверозлаковые смеси) способствуют накоплению гумуса, азота в почве, однако без внесения удобрений уменьшают в некоторой степени содержание в почве P_2O_5 и K_2O . В целом под воздействием многолетних трав плодородие почвы, оцениваемое по энергетическому эквиваленту в бессменных посевах, за 12 лет возросло без удобрений на 393,6 ГДж/га, а при их внесении — на 643,6. При этом в последнем случае имело место увеличение содержания в почве гумуса, общего азота, подвижных форм P_2O_5 и K_2O . Таким же образом, но только слабее воздействуют на плодородие почвы и однолетние травы (табл. 4).

При возделывании озимой пшеницы, ячменя и особенно кукурузы, наоборот, количество гумуса снижается, а в вариантах без удобрений происходит резкое обеднение почвы. Причем при внесении NPK в посевах ячменя на монокультуре положительный энергетический баланс в почве сохраняется, а в посевах двух других культур становится отрицательным, хотя это снижение частично компенсируется внесением NPK.

В целом следует отметить, что по набору культур в бессменных посевах без удобрений среднегодовой баланс энергии в почве за 12 лет был на 32,4 ГДж/га меньше, чем в севообороте, а при внесении NPK — на 22,3 ГДж/га.

Таким образом, через севооборот и внесение удобрений соблюдается правило замкнутости биохимического цикла, обозначенное В.И. Вернадским [1]. Кроме того, через севооборот в агроэкосистемах реализуется правило Ле Шателье, т.е. для усиления функционирования системы нужно из нее отвести продукты этой деятельности [3, 4].

В принципе к таким же результатам мы пришли в своих опытах, проведенных на опытных полях

лаборатории растениеводства в 1972—1976 гг. с кукурузой и многолетними травами. В этих опытах установлено, что многолетние травы способствуют накоплению гумуса и азота в почве, а кукуруза, особенно при глубокой вспашке, усиленно потребляет последний, несколько рыхлит органический комплекс почвы, обуславливая необходимость возделывания многолетних трав и создавая условия для увеличения его эффективности.

Если оценить среднегодовой баланс энергии в целом за 12 лет (2 ротации) без учета изменения плодородия почвы, то можно отметить, что при бессменных посевах наибольшую энергетическую эффективность имело возделывание многолетних трав, затем ячменя на монокорм и однолетних трав, потом кукурузы на силос и, наконец, озимой пшеницы. При этом наибольшей отзывчивостью на удобрения характеризовались многолетние травы и кукуруза, наименьшей — озимая пшеница, что делало внесение удобрений под нее энергетически нерентабельным и вело к снижению энергетического дохода. В целом в севообороте удобрения увеличивали дополнительную прибавку энергии на 6,8 ГДж/га, в бессменных посевах — на 5,0 ГДж/га. Энергетическая окупаемость удобрений в первом случае была в 1,7 раза больше, чем в последнем.

Данные табл. 2—5 не дают полного представления обо всех преимуществах, создаваемых севооборотом, а также об эффективности применения удобрений, пос-

колку при их получении не учитывался полный баланс энергии. Поэтому нами рассчитан баланс энергии в системе антропогенная энергия — почва — урожай (табл. 6), т.е. с учетом изменения плодородия почвы, оцениваемого через энергетический эквивалент, а не только накопления обменной энергии в урожае.

Из табл. 6 следует, что за 12 лет среднегодовая эффективность возделывания сельскохозяйственных культур в севообороте без удобрений в 1,5 раза выше, чем в бессменных посевах, а при внесении NPK — в 1,4 раза. Следовательно, с помощью удобрений можно только частично снять вредность бессменных посевов, и то в основном только в посевах многолетних трав и культур, выращиваемых на вегетативную массу. Более того, в абсолютном выражении в севообороте энергетическая прибавка от удобрений увеличивается на 18,0 ГДж/га, а по набору монокультур — только на 16,7 ГДж/га. Энергетическая рентабельность удобрений в первом случае (в севообороте) в 1,34 раза больше, чем во втором (в монокультуре). В бессменных посевах наиболее отзывчивы на удобрения многолетние травы, затем ячмень на монокорм, кукуруза на силос и однолетние травы. Применение удобрений под озимую пшеницу в монокультуре на прибавке энергии сказалось отрицательно. Эффективность удобрений сводится к нулю из-за их поглощения в микробиологических процессах, связанных с разрушением соломы и действием болезнетворных микроорганиз-

Таблица 5

Среднегодовой баланс энергии (ГДж/га) в системе антропогенный фактор — урожай при возделывании сельскохозяйственных культур бесценно и в севообороте (в среднем за 1984—1995 гг.) в вариантах без удобрений (числитель) и с НРК (знаменатель)

Показатель	Севооборот	Бесценные посевы					в среднем
		ячменя на менокорм	многолетних трав	оз. пшеницы	кукурузы на силос	однолетних трав	
E_{ϕ} — сбор с урожаем	<u>71,5</u>	<u>66,4</u>	<u>67,4</u>	<u>53,6</u>	<u>64,6</u>	<u>74,1</u>	<u>65,0</u>
ОЭ, ГДж/га	90,4	83,3	93,8	64,6	91,8	91,6	85,0
E_r — затраты энергии, ГДж/га	<u>17,5</u>	<u>23,3</u>	<u>15,0</u>	<u>25,4</u>	<u>31,1</u>	<u>33,6</u>	<u>25,7</u>
	29,6	34,4	26,7	44,2	49,8	48,8	40,8
ΔE видная прибавка энергии, ГДж/га	<u>54,0</u>	<u>43,1</u>	<u>52,4</u>	<u>28,4</u>	<u>33,5</u>	<u>40,5</u>	<u>39,2</u>
	60,8	48,9	67,1	20,4	42,0	42,8	44,2
Дополнительная прибавка энергии от удобрений, ГДж/га	6,8	5,8	14,7	-8,0	8,5	2,3	5,0
η ($\eta = E_{\phi} : E_r$) — коэффициент видной энергетической эффективности производства, %	<u>4,09</u>	<u>2,85</u>	<u>4,49</u>	<u>2,11</u>	<u>2,08</u>	222	<u>2,53</u>
	317	242	314	146	184	187	208
Энергетическая окупаемость (рентабельность) производства, %	<u>309</u>	<u>185</u>	<u>349</u>	<u>111</u>	<u>108</u>	122	<u>53</u>
	212	142	214	46	84	87	108
Энергетическая окупаемость (рентабельность) удобрений, %	56	52	126	-43	45	15	33

мов. С учетом изменения плодородия почвы бесценные посевы кукурузы в Нечерноземной зоне без внесения удобрений недопустимы, а их применение может привести к большому негативным экологическим последствиям, так как коэффициент энергетической эффективности ее возделывания в этом случае равен всего 15%, т.е. в 13 раз меньше нижнего предела — 2. Принимая во внимание влияние бесценных посевов на

плодородие почвы, можно сказать, что упрощение структуры посевных площадей при снижении количества удобрений ведет к деградации агробиогеноценозов. Внесение же высоких доз удобрений также вызывает рост отрицательных экологических последствий и снижение энергетической эффективности производства.

Исследования показали, что севооборот является важнейшим

Таблица 6

Среднегодовой баланс энергии (ГДж/га) в системе антропогенный фактор — почва — урожай при возделывании сельскохозяйственных культур бессеменно и в севообороте (в среднем за 1984—1995 гг.) в вариантах без удобрений (числитель) и с NPK (знаменатель)

Показатель	Севооборот	Бессеменные посевы					в среднем
		ячменя на моно-корм	много-летних трав	оз. пшеницы	кукурузы на силос	одно-летних трав	
E_c — выход энергии в системе с учетом изменения плодородия почвы, ГДж/га	$\frac{69,9}{100,0}$	$\frac{53,5}{91,9}$	$\frac{100,2}{147,4}$	$\frac{52,0}{64,3}$	$\frac{20,9}{57,1}$	$\frac{77,8}{103,1}$	$\frac{61,0}{93,2}$
ΔE — баланс энергии всего в агроэкосистеме с учетом плодородия почвы, ГДж/га	$\frac{52,4}{70,4}$	$\frac{32,0}{57,5}$	$\frac{85,2}{120,7}$	$\frac{26,8}{20,1}$	$\frac{-10,2}{7,3}$	$\frac{44,2}{54,3}$	$\frac{35,2}{51,9}$
$\eta = E_c : E_T$ — коэффициент энергетической эффективности деятельности агроэкосистемы, %	$\frac{399}{338}$	$\frac{237}{267}$	$\frac{668}{552}$	$\frac{805}{145}$	$\frac{-33}{15}$	$\frac{232}{188}$	$\frac{237}{228}$
Дополнительная прибавка энергии от удобрений в агроэкосистеме с учетом плодородия почвы, ГДж/га	18,0	25,5	35,5	-6,7	17,5	10,1	16,7
Энергетическая окупаемость (рентабельность) удобрений, %	149	230	303	-36	94	66	111

средством увеличения эффективности использования всех техногенных факторов, в том числе и техники. Если принять, что в севообороте коэффициент полезного использования трактора равен 1, то при монокультуре он не превышает и 0,3. Энергетические и экономические затраты на производство техники при севообороте раскладываются на большее количество культур, чем при монокультуре, в связи с чем в последнем случае энергетическая и экономическая эффективность,

как правило, всегда будет ниже. Узкая специализация требует сортового конвейера, т.е. набора сортов, отличающихся по срокам созревания. В техническом плане она оправдана лишь тогда, когда возделывание бессеменной культуры связано с подбором узкоспециализированной техники, как, например, при выращивании кукурузы на зерно. Однако и здесь требуется повышенное количество удобрений, ядохимикатов, обработок почвы, а также проведение орошения. Все это в конечном

счете связано с ростом отрицательных экологических последствий и превращением почвы в обычный субстрат для размещения растений, т.е. возделывание культуры переходит полностью на техногенно-химическую технологию, подобную гидропонике. Именно на таком принципе функционируют хозяйства кукурузного пояса в США, однако и в этом случае люцерно-кукурузные и другие укороченные плодосмены всегда экологически и энергетически эффективнее, чем монокультура.

Использование удобрений в севообороте тоже более эффективно (табл. 7). В среднем коэффициент использования, например, азота удобрений в севообороте в 1,33 раза больше, чем по набору

тех же культур, но в бессменных посевах (табл. 7). Самый низкий коэффициент использования азотных удобрений отмечен у зерновых в бессменных посевах в связи с меньшей урожайностью из-за развития болезней и действия других причин, указанных выше. Возделывание кукурузы в бессменных посевах также связано с большими потерями азота, поскольку из-за усиленной аэрации, вызванной обработкой междурядий, азот удобрений теряется в результате нитрификации и последующей денитрификации, а также из-за вымывания. Следовательно, после кукурузы необходима «воровская» озимая культура. В рассматриваемом нами севообороте такой и явилась озимая рожь.

Таблица 7

Среднегодовой баланс азота в системе удобрения — почва — урожай при возделывании сельскохозяйственных культур в бессменных посевах и в севообороте (в среднем за 12 лет) в вариантах без удобрений (числитель) и при внесении NPK (знаменатель)

Показатель	Севооборот	Бессменные посевы					в среднем
		ячменя на монокорн	многолетних трав	оз.пшеницы	однолетних трав + оз.рожь на з.к.	кукурузы на силос	
Среднегодовое изменение содержания N в почве (ΔN_p), кг/га	$\frac{-12}{14}$	$\frac{-29}{5}$	$\frac{30}{23}$	$\frac{-11}{22}$	$\frac{-32}{9}$	$\frac{12}{26}$	
Вынос N с урожаем ($N_{ур}$), кг/га	$\frac{76}{147}$	$\frac{64}{106}$	$\frac{88}{179}$	$\frac{61}{121}$	$\frac{59}{144}$	$\frac{71}{147}$	$\frac{69}{119}$
Баланс ΔN в системе, кг/га	$\frac{64}{50}$	$\frac{35}{43}$	$\frac{118}{87}$	$\frac{50}{-12}$	$\frac{27}{-15}$	$\frac{83}{35}$	$\frac{52}{23}$
Коэффициент использования N удобрений, %	64	62	79	39	51	56	48

Наибольший коэффициент использования азота удобрений в бессменных посевах отмечен при возделывании многолетних трав, которые уже на 2-й год жизни в основном представлены тимофевкой луговой.

Довольно высоким был коэффициент использования азотных удобрений ячменем на монокультуре (даже более высокой, чем у однолетних трав). Это объясняется тем, что ячмень убирали в молочно-восковую спелость при максимальном накоплении питательных веществ, в том числе и азотистых.

Следует более подробно рассмотреть баланс азота (ΔN) в системе удобрений — почва — урожай, определяемый по формуле:

$$\Delta N = N_{ур} + \Delta N_{п} - N_{уд}$$

где $N_{ур}$ — вынос с урожаем; $\Delta N_{п}$ — изменение содержания в почве; $N_{уд}$ — внесено с удобрением.

Такой баланс по сути дела показывает чистую продуктивность биологической азотфиксации с учетом потерь азота, т.е. это азотонакопление биологической системой, равное биологической азотфиксации минус потери азота.

В севообороте реализуется разноразнокачественность реакции предшественника и последующей культуры на ритмы окружающей среды. Так, азот, накопленный бобовыми, используется последующими злаками, которые, в свою очередь, вычерпывая его из почвы, создают условия для усиления биологической азотфиксации [3, 5, 6]. Более того, в севообороте после пропашной культуры — ку-

курузы, создающей условия для увеличения потерь азота, идет «воровская» озимая культура — рожь на зеленый корм, вовлекающая в биологический круговорот легкорастворимые формы азота. В этом смысле было бы лучше высевать озимый рапс. Однако в Нечерноземной зоне на очень тяжелых почвах он не всегда удается.

В связи с изложенным выше в севообороте улучшаются условия для биологической азотфиксации и снижаются потери азота из-за денитрификации и вымывания. Благодаря этому среднегодовой баланс азота в системе удобрения — почва — урожай при внесении NPK составил 50 кг/га, без их внесения — 64 кг/га, или был соответственно в 2,2 и 1,2 раза больше, чем в среднем по набору культур в бессменных посевах.

Наибольшую прибавку связанного азота в агроэкосистеме при бессменном возделывании обеспечивают многолетние травы (87—118 кг/га), даже несмотря на то, что их пересевали через 6 лет. Еще больший эффект создается, если бобово-злаковые травостой возделываются в севообороте и пересеваются через 2 года. В этом случае баланс (чистая продуктивность биологической азотфиксации) увеличивается без внесения удобрений до 200—220 кг/га, а при внесении в 1-й год 126P120K, во 2-й — 138N126P150K эта прибавка составляет 180—190 кг/га.

Без внесения удобрений в бессменных посевах высокая чистая продуктивность биологической азотфиксации наблюдается в 6-м

поле севооборота: озимая рожь — викоовсяная смесь (+83 кг/га), однако в этом случае при внесении азота наблюдается снижение азотфиксирующей способности вики, что ведет к уменьшению баланса N до 35 кг/га (почти в 2,4 раза), т.е. при бессменном посеве в звене озимая рожь — викоовсяная смесь количество вносимого азота необходимо уменьшить почти на 50%. В севообороте же после викоовсяной смеси идет ячмень на монокорм, требующий усиленного азотного питания. При этом биологический азот, накопленный викой в клубеньках, корнях и пожнивных остатках, хорошо сохраняется до весны.

Наименьшая прибавка биологического азота наблюдается при возделывании кукурузы. Более того, при внесении NPK в се бессменных посевах имеет место отрицательный баланс ΔN. Причины этого объяснены выше. Севооборот позволяет избежать этого.

Следует отметить, что внесение минерального азота даже на фосфорно-калийном фоне снижает баланс азота в системе удобрения — почва — урожай, т.е. уменьшает размер биологической азотфиксации и создает условия для увеличения (диссипации) потерь азота. В ряде работ [4—6] нами отмечена такая же закономерность, причем и по другим элементам. Это объясняется тем, что система почва — растения обладает определенным гомеостазом, направленным на сохранение и улучшение местообитания продуцентов (растений). Благодаря этому, несмотря на вынос элементов минерального питания, нет адек-

ватного снижения содержания доступных форм в почве (табл. 7). Оно в 2—6 раз меньше, чем вынос, что объясняется смещением равновесия по правилу Ле Шателье в системе питательных веществ — доступные формы ⇌ недоступные соединения — в сторону, противоположную воздействию на нее. Поэтому, если доступные формы убирать из системы, то усиливается переход питательных веществ из недоступных соединений в усвояемые растениями. При внесении удобрений равновесие смещается вправо. Фитоденоз как бы стремится извлечь почву от избытка доступных элементов минерального питания, и происходят их переход в усвояемые формы, увеличение потерь или выноса с урожаем. По этой причине внесение NPK снижает баланс элементов минерального питания в системе удобрения — почва — урожай (табл. 7). При этом это уменьшение в севообороте проявляется в 2,1 раза меньше, чем по набору культур в бессменных посевах. В первом случае по азоту оно составило 14 кг/га, а во втором — 29. Таким образом, отрицательное действие азота на азотфиксацию и его баланс в системе удобрения — почва — урожай в севообороте меньше, чем в бессменных посевах.

Особенно резкое отрицательное влияние на этот показатель оказало внесение NPK при бессменном возделывании озимой пшеницы и кукурузы. Несмотря на увеличение содержания азота в почве, в целом при внесении NPK его потери системой удобрения — почва — урожай составляли 12 н

15 кг/га в год (табл. 7), т.е. снижение среднегодового баланса N по сравнению с контролем (без удобрений) составило 62 и 42 кг/га. Эффективность азотных и других удобрений, вносимых под озимую пшеницу в бессменных посевах, резко уменьшалась из-за развития болезней и усиления денитрификации и вымывания. Последнее можно отметить и по кукурузе.

В условиях экономического кризиса, когда возможность и экономическая эффективность применения удобрений для стабилизации и интенсификации растениеводства резко уменьшаются, особую роль приобретают севообороты, укороченные плодосмены и посевы травосмесей, насыщенных бобовыми, которые повышают плодородие почвы, увеличивая в ней содержание гумуса, общего азота, стабилизируют продуктивность и энергетическую эффективность возделывания небобовых культур. При этом, чем больше последние вычерпывают азот из почвы, тем выше эффективность возделывания бобовой культуры. Интенсивные сорта лучше реагируют на высокие дозы удобрений, чем экстенсивные, но если они не получают удобрений, то быстрее истощают почву, хотя при этом баланс питательных веществ и энергии в системе удобрения — почва — урожай больше, чем при возделывании экстенсивных сортов. Анализируя результаты опытов других исследователей, а также данные своих наблюдений, мы пришли к выводу, что высказывания о преимуществе экстенсивных сортов над интенсивными в условиях примене-

ния удобрений неправомерны. В севообороте на типичных для Нечерноземной и лесостепной зон почвах интенсивные сорта даже в отсутствие удобрений всегда более урожайны, чем экстенсивные. Последние, видимо, имеют преимущество только в очень специфических условиях, например, на бедных кислых почвах, и то только в бессменных посевах.

Заключение

Роль кормовых культур в севообороте заключается в увеличении и стабилизации его энергетической и экологической эффективности. Кормовые культуры, особенно многолетние и однолетние бобовые и бобово-злаковые травосмеси, уменьшают диссипацию (рассеяние) энергии и питательных веществ, усиливая их ассимиляцию, улучшая плодородие почвы, и повышают эффективность факторов интенсификации продукционного процесса. В то же время последние улучшают это благоприятное действие трав на агроэкосистемы.

Севообороты должны быть составлены с учетом биосферного принципа, обоснованного В.И. Вернадским, так, чтобы предшественник, ухудшая свое местобитание, улучшал условия для произрастания последующей культуры и чтобы последняя нейтрализовывала это ухудшение с усилением продукционного процесса. Таким образом, в севообороте должны чередоваться культуры с разной биологией роста и развития. Кроме того, севообороты должны составляться так, чтобы равномернее и полнее в течение

года использовать технику и другие средства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. — 2. Кобозев И.В., Маркин Г.С., Лазарев Н.Н. и др. Разработка новых ресурсосберегающих технологий обработки почвы. — Изв. ТСХА, 1995, вып. 2, с. 22—40. — 3. Кобозев И.В., Парахин Н.В., Темирсултанов Э.Э. Этот трудный путь в ноосферу. М.: МИФИ, 1995. — 4. Кобозев И.В., Тюльдюков В.А., Парахин Н.В. Предотвращение критических ситуаций в агроэко-

системах. М.: Изд—во МСХА, 1995. — 5. Парахин Н.В., Баткова Т.В., Кобозев И.В. Баланс энергии общего азота и других питательных веществ в агроэкосистемах в зависимости от состава растительности. — Тез. докл. 4-й международ. конфер. СОИСАФ «Биохимический азот в растениеводстве», 1966, с. 149—151. — 6. Парахин Н.В., Кобозев И.В., Маркин Г.С., Унежев Х.М. Возделывание бобовых культур как фактор стабилизации продукционного процесса в агроэкосистемах в период экономического кризиса. — Там же, с. 139—141.

*Статья поступила 27 июня
1977 г.*

SUMMARY

The data obtained for 12 years on evaluation of yield stability in different crops grown as monoculture and in rotation are presented in the paper. Ecological and energetic harmfulness of «break—down» of crop rotations is shown.