

УДК 631.51

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

А. И. ПУПОНН, А. В. ЗАХАРЕНКО

(Кафедра земледелия и методики опытного дела)

Разработана методика энергетической оценки элементов системы земледелия. Определена энергетическая эффективность многолетнего применения разных по интенсивности систем обработки почвы и гербицидов в севооборотах. При решении вопросов совершенствования элементов системы земледелия предлагается их влияние на биоэнергетический потенциал агрофитоценоза оценивать по коэффициенту энергетической эффективности использования ФАР, учитывающему фактический уровень техногенных энергозатрат, и энергосодержанию органического вещества пахотного слоя почвы.

Развитие теоретических основ и совершенствование методологии энергетической оценки элементов системы земледелия невозможны без поиска высокоэффективных приемов управления продуктивностью агрофитоценозов. Эти приемы направлены на обеспечение наиболее благоприятных условий для роста и развития культурного компонента и максимальной утилизации приходящей на посевы энергии ФАР при рациональном использовании почвенных ресурсов и сохранении экологического равновесия в агроэкосистеме.

Биоэнергетическая оценка элементов системы земледелия пред-

полагает использование принципиально новых методических подходов при разработке программ научных исследований, введение наряду с традиционными агрономическими показателями качественно новых параметров, адекватно отражающих интенсивность и направленность процессов трансформации потоков естественной и антропогенной энергии в агрофитоценозах. Современный уровень развития сельскохозяйственной науки требует создания целостной концепции энерго- и массообмена в системе почва — растение — атмосфера — человек, направленной на оптимизацию потоков

вещества и энергии при производстве продукции растениеводства.

Начало изучения энергетических потоков в природных экосистемах, агроценозах и промышленной сфере было положено работами известного эколога Odum [10, 11]. Затем данная проблема достаточно широко освещалась в современной научной литературе [1, 2, 3, 9]. Однако во всех научных публикациях затрагивается только та часть энергетических потоков, которая характеризует либо отдельную подсистему (почву, растение, атмосферу и др.), либо ту часть энергии, которая утилизируется человеком. При этом не учитывается качественный характер трансформации потоков естественной и антропогенной энергии при взаимодействии отдельных подсистем, что обусловлено огромным количеством факторов, оказывающих влияние на трансформацию энергетических потоков, и сложностью их количественной оценки.

Для синтеза целостной системы энерго-, массообмена в агроэкосистеме необходимы изучение отдельных энергетических потоков и выявление характера функциональных связей между ними.

Целью наших исследований была разработка научных основ биоэнергетической оценки элементов системы земледелия. В связи с этим ставились следующие задачи:

— разработать методологические и методические положения биоэнергетической оценки элементов системы земледелия;

— дать биоэнергетическую оценку разным по интенсивности

и характеру воздействия на почву системам механической обработки;

— обосновать роль севооборота в повышении биоэнергетической эффективности системы земледелия;

— оценить энергетическую эффективность применения удобрений и гербицидов в системе земледелия.

Методика

Исследования проводили в 1983—1997 гг. на экспериментальной базе ТСХА (учхоз «Михайловское» Подольского района Московской области) в стационарных полевых многофакторных опытах. Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая. Программы исследований и схемы экспериментов подробно описаны в опубликованных работах [4, 6].

На основе результатов многолетних исследований и обобщения отечественной и зарубежной научной литературы по данному вопросу нами разработана методика энергетической оценки элементов системы земледелия. Подробное описание методики приводится в опубликованных методических рекомендациях и ряде научных статей [5, 7, 8].

Результаты

Одним из важных научных положений при разработке практических рекомендаций по совершенствованию систем механической обработки почвы является исследование их биоэнергетической эффективности. Совершен-

ствование систем обработки почвы диктуется необходимостью разработки и внедрения энергосберегающих адаптивно-ландшафтных технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Обработка почвы по уровню прямых энергозатрат является одним из наиболее энергоемких элементов в современных системах земледелия. На ее проведение расходуется до 40% энергетических и до 25% трудовых затрат при возделывании сельскохозяйственных культур [4].

В результате наших исследований установлено, что наиболее высоким уровнем энергозатрат характеризуются системы обработки почвы, включающие применение энергоемкого ротационного плуга ПР-2,7, а также от-

вальных плугов типа ПН-4-35, ПЛН-4-35 и ПТК-3-40. При традиционной системе отвальной обработки почвы в зернопропашном севообороте в среднем за 23 года исследований совокупные энергозатраты составили 28,1 тыс. МДж/га, в зернотравяном и плодосменном в среднем за 16 лет — соответственно 30,1 и 34,0 тыс. МДж/га.

Ежегодные затраты техногенной энергии на механическую обработку почвы в среднем за 5 ротаций зерноотрава и плодосменного севооборотов (1975—1994 гг.) при отвальной обработке составили 2,74 тыс. МДж/га, нулевой — 1,01, поверхностной — 1,80, чизельной — 2,47, роторной — 3,70, плоскорезной — 2,10, сочетания отвальной и нулевой — 2,51 тыс. МДж/га (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Энергетическая эффективность возделывания полевых культур при разных системах обработки почвы (среднее за 1975—1994 гг.)

Система обработки почвы (условное название)	Энергозатраты на обработку почвы. МДж/га	Расход дизельного топлива на 1 ц корм. ед., кг	Энергоемкость 1 ц корм. ед., МДж	Коэффициент энергетической эффективности
Отвальная	2740	2,51	720	1,52
Нулевая	1010	1,93	696	1,56
Поверхностная	1800	2,16	680	1,61
Чизельная	2470	2,33	689	1,58
Роторная	3700	2,83	725	1,51
Плоскорезная	2100	2,46	715	1,53
Сочетание отвальной и нулевой	2510	2,43	705	1,55

Наиболее высокий коэффициент энергетической эффективности и наименьшая энергоемкость получения основной продукции полевых культур отмечены при

системах поверхностной и чизельной обработки почвы.

В зернопропашном севообороте высоким уровнем энергосодержания урожая характеризовались при

системы фрезерной интенсивной, трехъярусной и отвальной с фрезерованием обработки почвы. Наиболее высокий коэффициент энергетической эффективности ($K_{\Phi AP}$) отмечен при системах фрезерной минимальной (1,47), отвальной с дискованием (1,45) и отвальной обработки почвы с фрезерованием (табл. 2).

Совершенствование традиционных и разработка новых приемов и систем механической обработки почвы в современном земледелии направлены на создание оптимальных агробиологических параметров ее пахотного слоя, способных обеспечить наиболее благоприятные условия для максимальной утилизации солнечной энергии культурным компонентом агрофитоценоза. В этой связи большое значение имеют показатели, характеризующие эффективность использования энергии ФАР сельскохозяйственными культурами.

Коэффициент использования ФАР ($K_{\Phi AP}$, %) определяется как отношение энергосодержания урожая (E_y , Мдж/га) к энергетическому эквиваленту ФАР, приходящей на посевы сельскохозяйственных культур за вегетацию ($E_{\Phi AP}$, Мдж/га):

$$K_{\Phi AP} = \frac{E_y}{E_{\Phi AP}} \cdot 100\% \quad (1)$$

При расчете коэффициента энергетической эффективности использования ФАР ($K_{\Phi AP}$, %) предлагается учитывать техногенные энергозатраты:

$$K_{\Phi AP}^e = \frac{E_y - E_c}{E_{\Phi AP}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где E_c — суммарные техногенные энергозатраты при возделывании сельскохозяйственных культур.

Результаты исследований свидетельствуют, что наиболее эффективное использование энергии ФАР в севооборотах обеспечивают системы чизельной ($K_{\Phi AP}^e = 0,54\%$), поверхностной (0,53%), роторной (0,53%), фрезерной интенсивной (0,42%), трехъярусной и отвальной обработки с фрезерованием.

С учетом техногенных энергозатрат изучаемые системы обработки почвы располагаются в следующей последовательности, в порядке уменьшения коэффициента энергетической эффективности использования ФАР: фрезерная минимальная, отвальная с дискованием ($K_{\Phi AP}^e = 0,13$) > фрезерная интенсивная, отвальная с фрезерованием (0,12) > комбинированная, отвальная (0,10).

В связи с тем, что согласно схеме опыта в зернотравяном и плодосменном севооборотах использовались только минеральные удобрения (солома как органическое удобрение изучается с 1987 г.), для корректного сопоставления экспериментальных данных в зернопропашном севообороте рассматриваются средние данные за 4 ротации (1970—1992 гг.) по фону 2 НРК, близкому по нормам внесения минеральных удобрений к зернотравяному и плодосменному севооборотам.

Энергетическая оценка возделывания полевых культур
при разных системах обработки почвы в зернопропашном севообороте
(среднее за 1975—1990 гг.)

Система обработки почвы (словесное название)	Суммарные энергозатраты, $\times 10^3$ МДж/га	Энергосодержание основной продукции, $\times 10^3$ МДж/га	Коэффициент энергетической эффективности	Выход основной продукции, корм. ед. с 1 га	Расход дизельного топлива на 1 ц корм. ед.	Энергоемкость 1 ц корм. ед. Мдж	Коэффициент использования ФАР, %*	Коэффициент энергетической эффективности использования ФАР, %*
Отвальная	28,6	38,4	1,34	32,3	3,2	885	0,38	0,10
Фрезерная минимальная	27,8	40,8	1,47	34,3	2,5	810	0,40	0,13
Фрезерная интенсивная	30,6	42,2	1,38	35,6	3,5	860	0,42	0,12
Отвальная с фрезерованием	28,6	41,1	1,44	34,6	2,8	827	0,41	0,12
Отвальная с дискованием	28,3	41,1	1,45	34,6	2,8	818	0,41	0,13
Комбинированная	28,1	38,5	1,37	32,3	2,9	870	0,38	0,10
Трехъярусная и отвальная с фрезерованием	29,0	42,3	1,46	35,4	3,0	819	0,42	0,13

* Здесь и в табл. 3 и 4 при расчете коэффициентов ФАР использованы данные Н. С. Шатилова и А. Г. Замаева (1991).

Установлено, что в среднем за 4 ротации (1975—1990 гг.) плодосменного севооборота суммарные энергозатраты и затраты горючего при возделывании сельскохозяйственных культур были соответственно на 11 и 6%, 14 и 13% выше, чем в зернотравяном и зернопропашном севооборотах.

Вместе с тем в плодосменном севообороте отмечено наиболее высокое энергосодержание основной продукции сельскохозяйственных культур, которое несмотря на высокий уровень суммарных энергозатрат обеспечивало высокий коэффициент его энергетической эффективности (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Энергетическая эффективность возделывания сельскохозяйственных культур в севооборотах различной специализации

Показатель	Севооборот		
	зерно- травяной	зерно- пропашной	плодо- сменный
Суммарные энергозатраты, МДж/га	30535	29426	34360
Энергосодержание основной продукции, МДж/га	45317	39719	55387
Коэффициент энергетической эффективности	1,48	1,35	1,61
Выход основной продукции с 1 га, ц корм. ед.	41,2	34,4	50,9
Энергоемкость 1 ц корм. ед., МДж	741	855	675
Расход дизельного топлива на 1 ц корм. ед., кг	2,56	2,81	2,18
Коэффициент использования ФАР, %	0,47	0,38	0,57
Коэффициент энергетической эффективности использования ФАР, %	0,15	0,10	0,22

Таким образом, судя по показателям энергоемкости основной продукции и коэффициентам использования ФАР наиболее высокий агроэнергетический эффект достигается в 4-польном плодосменном севообороте (озимая пшеница — картофель — ячмень — однолетние травы).

Анализ структуры энергетических потоков в агрофитоценозах свидетельствует, что на долю удобрений приходится более 50% суммарных энергозатрат. Экспе-

риментальные данные свидетельствуют, что в зернопропашном севообороте энергетический вклад полного минерального удобрения (фон НРК) в общий энергобаланс агрофитоценоза мало различается по ротациям севооборота и составляет 57,8—84,3 тыс. МДж/га. Аналогичная тенденция отмечена и по отдельным элементам питания. Наиболее высоким энергосодержанием характеризуются азотные удобрения, ежегодный энергетический

вклад которых в общий энергобаланс в среднем за 4 ротации составил 9,58 тыс. МДж/га. Уровень энергосодержания фосфорных и калийных удобрений был существенно ниже (соответственно 1,44 и 0,92 тыс. МДж/га).

В общей структуре энергозатрат на применение удобрений преобладают энергозатраты на их производство с учетом энергосодержания действующего вещества. В среднем за 4 ротации зерноотрава и плодосменного севооборотов ежегодные энергозатраты на производство с учетом энергосодержания действующего вещества удобрений соста-

вили 13,3 тыс. МДж/га, а на их транспортировку и внесение — 0,56 тыс. МДж/га (соответственно 96 и 4% суммарных энергозатрат на применение удобрений).

Анализ энергетической эффективности применения удобрений свидетельствует, что в зернопропашном севообороте в среднем за 23 года наименьшим уровнем суммарных энергозатрат в расчете на 1 ц корм. ед. основной продукции характеризовался фон НРК. Дополнительное применение навоза и соломы способствовало повышению суммарных энергозатрат соответственно на 43 и 103 МДж/ц (табл. 4).

Таблица 4

Энергетическая эффективность различных фонов удобрений в зернопропашном севообороте (среднее за 1970—1996 гг.)

Показатель	Без удобрений	Фон удобрений		
		НРК	НРК+солома	НРК+навоз
Суммарные энергозатраты:				
на всю технологию, МДж/га	13028	29426	30965	33908
на 1 ц корм. ед. основной продукции, МДж	987	855	898	958
Энергозатраты:				
на применение удобрений, МДж/га	—	13010	14548	19788
на 1 кг д. в. удобрений, МДж	—	39	38	43
Энергосодержание основной продукции (МДж) в расчете:				
на 1 га	15450	39719	40702	42700
на 1 кг д. в. удобрений	—	119	107	93
на 1 МДж энергозатрат на применение удобрений	—	3,1	2,8	2,2
Коэффициент энергетической эффективности	1,19	1,35	1,31	1,26
$K_{\text{ФАР}}^{\text{в}}$, %	0,15	0,38	0,39	0,41
$K_{\text{ФАР}}^{\text{с}}$, %	0,02	0,10	0,09	0,08

На фоне внесения навоза в сочетании с полным минеральным удобрением энергозатраты на их применение составили 19,8 тыс. МДж/га, что соответственно на 6,8 и 5,2 тыс. МДж/га выше, чем на фонах НРК и НРК+солома.

Применение полного минерального удобрения обеспечивает наиболее высокое энергосодержание основной продукции полевых культур как в расчете на 1 кг д. в. удобрений, так и на 1 МДж энергозатрат на их применение (соответственно 119 и 3,1 МДж). На этом фоне удобрений отмечены наиболее высокие коэффициенты энергетической эффективности (1,35) и энергетической эффективности использования ФАР (0,10%).

Для интегральной биоэнергетической оценки удобрений в агроценозах необходимо учитывать их вклад в формирование биоэнергетического потенциала почвы. Это касается прежде всего влияния удобрений на содержание гумуса и микробной массы в пахотном слое. Полученные нами данные свидетельствуют, что внесение навоза в сочетании с полным минеральным удобрением заметно увеличивает содержание гумуса и запаса энергии в гумусе. Так, энергосодержание гумуса в пахотном слое (0—20 см) дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на неудобренном фоне составило $8,2 \times 10^5$ МДж/га, на фоне НРК — $9,0 \times 10^5$ МДж/га, НРК+солома — $9,8 \times 10^5$ МДж/га, НРК+навоз — $10,4 \times 10^5$ МДж/га. Микробная масса пахотного слоя почвы аккумулирует большое ко-

личество энергии. При отвальной системе обработки почвы на фоне полного минерального удобрения в сочетании с соломой энергосодержание микробной массы составило 784,2 МДж/га.

Таким образом, применение навоза и соломы в сочетании с полным минеральным удобрением заметно увеличивает биоэнергетический потенциал пахотного слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы.

Установлено, что доля гербицидов в общей структуре техногенных энергозатрат при возделывании сельскохозяйственных культур сравнительно невелика, не превышает 3—4% [5]. Вместе с тем рациональное применение гербицидов обеспечивает весьма высокий агроэнергетический эффект. В зернотравяном и плодосменном севооборотах энергосодержание прибавки урожая озимой пшеницы в среднем за 6 лет составило при системе роторной обработки — 8,04 тыс. МДж/га, чизельной — 7,99, отвальной — 7,50 тыс. МДж/га (табл. 5).

В посадках картофеля и посевах ячменя в среднем за 5 лет энергетическая эффективность применения гербицидов составила соответственно 3,88—5,12 и 4,08—4,98 тыс. МДж/га. Энергосодержание прибавки урожая в посевах овса было ниже и в среднем за 4 года составило 1,76—2,81 тыс. МДж/га. В посевах озимой пшеницы наиболее высокое энергосодержание прибавки урожая от применения гербицидов отмечено на фоне роторной и чизельной систем обработки почвы, в посадках

**Энергосодержание прибавки урожая сельскохозяйственных культур,
полученной от применения гербицидов ($\times 10^3$ МДж/га)**

Система обработки почвы (условные названия)	Культура севооборота			
	озимая пшеница (в среднем за 1975, 1976, 1979, 1983, 1987 и 1991 гг.)	картофель (в среднем за 1976, 1980, 1984, 1988, 1992 гг.)	ячмень (в среднем за 1977, 1981, 1985, 1989, 1993 гг.)	овес (в среднем за 1980, 1984, 1988, 1992 гг.)
Отвальная	7,50	4,32	4,58	2,52
Нулевая	6,75	3,88	4,12	1,76
Поверхностная	7,80	4,14	4,52	2,24
Чизельная	7,99	5,12	4,57	2,81
Роторная	8,04	4,89	4,13	2,60
Плоскорезная	7,77	4,58	4,08	2,52
Сочетание отвальной и нулевой	7,47	4,95	4,98	2,78

картофеля — на фоне чизельной и сочетания отвальной и нулевой, в посевах ячменя — на фоне сочетания отвальной и нулевой, в посевах овса — на фоне чизельной и сочетания отвальной и нулевой систем обработки почвы.

Выводы

1. На основе разработанной методики энергетической оценки элементов системы земледелия определена агроэнергетическая эффективность многолетнего применения разных по интенсивности систем механической обработки почвы и гербицидов в севооборотах различной специализации:

— наиболее высокий агроэнергетический эффект достигается в 4-польном плодосменном севообороте (озимая пшеница — картофель — ячмень — однолетняя бобово-злаковая смесь);

— системы чизельной и поверхностной обработки почвы обеспечивают наиболее высокий коэффициент энергетической эф-

фективности (соответственно 1,58 и 1,61) и наименьшую энергоёмкость получения основной продукции полевых культур (680 и 689 МДж/ц);

— доля гербицидов в структуре совокупных энергозатрат на всю технологию возделывания полевых культур не превышает 5—7%. Наиболее высокая энергетическая эффективность применения гербицидов отмечается на фоне системы чизельной (коэффициент энергетической эффективности 1,76) и сочетания отвальной и нулевой обработки почвы (1,73).

2. Наиболее эффективное использование приходящей на посевы полевых культур энергии ФАР обеспечивают системы чизельной ($K_{\text{ФАР}} = 0,54\%$), поверхностной (0,53%) и роторной (0,53%) обработки почвы. С учетом уровня техногенных энергозатрат системы обработки почвы располагаются в следующей последовательности, в порядке уменьшения коэффициента энергетической

эффективности использования ФАР: фрезерная минимальная ($K_{\text{ФАР}}^c = 0,13\%$) > фрезерная интенсивная (0,12%) > отвальная (0,10%).

3. При использовании навоза и соломы на фоне полного минерального удобрения заметно повышается энергетический потенциал органического вещества в пахотном слое дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы за счет увеличения энергосодержания гумуса и микробной массы.

4. При решении теоретических и практических вопросов совершенствования элементов системы земледелия предлагается оценивать их эффективность на основе менее подверженных влиянию конъюнктуры рынка показателей коэффициента энергетической эффективности использования ФАР сельскохозяйственными культурами, суммарных техногенных энергозатрат и энергопотенциала органического вещества пахотного слоя почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Базаров Е. П.* Методические рекомендации по оценке топливно-энергетических затрат в растениеводстве. — М.: ВАСХНИЛ, 1985. — 2. *Булаткин Г. А.* Эколого-энергетические аспекты продуктивности агроценозов. — Пущино, НИИПиА, 1986. — 3. *Жу-*

ченко А. А., Афанасьев В. Н. Энергетический анализ в сельском хозяйстве. — Кишинев: Штиинца, 1988. — 4. *Пупонин А. И.* Обработка почвы в интенсивном земледелии Нечерноземной зоны. — М.: Колос, 1984. — 5. *Пупонин А. И., Захаренко А. В.* Оценка энергетической эффективности возделывания сельскохозяйственных культур. — Метод. рекомендации, М.: РАСХН, 1994. — 6. *Пупонин А. И., Захаренко А. В., Дебердеев К. Ш.* Влияние разных систем обработки почвы, гербицидов и удобрений на засоренность посевов и урожайность полевых культур. — Изв. ТСХА, 1988, вып. 5, с. 77—85. — 7. *Пупонин А. И., Захаренко А. В.* Оценка энергетической эффективности возделывания сельскохозяйственных культур в системе земледелия. — М.: Изд-во ТСХА, 1998. — 8. *Пупонин А. И., Захаренко А. В.* Биоэнергетический потенциал органического вещества дерново-подзолистой почвы при разных системах механической обработки и удобрения. — Изв. ТСХА, 1998, вып. 1, с. 44—53. — 9. *Шатилов И. С.* Научные основы программирования урожая сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1978. — 10. *Odum H.* Amer/ Sci., 1960, vol. 48, p. 1—8. — 11. *Odum H.* The World Food Problem., Wash., 1967, vol. 3, p. 55—94.
Статья поступила 19 февраля 1999 г.

SUMMARY

Technique of energetic evaluation of farming system elements has been developed. Agroenergetic efficiency of long-term application of soil management systems with different intensiveness and of herbicides in crop rotations has been determined. In solving problems of improving the farming system elements it is suggested to evaluate their effect on bioenergetic potential of agrophytocenosis by the coefficient of energetic efficiency of using FAR which takes into account actual level of technogenic energy expenses and by energy content of organic matter in soil arable layer.