

БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ

В.П. Сутягин, Тверская государственная сельскохозяйственная академия

При разработке экологически сбалансированной системы земледелия особую значимость имеет анализ экологической емкости агроландшафта и структура его биоэнергетического потенциала. Структуры и процессы в сельскохозяйственных системах образно можно представить в виде «черных ящиков» (под «черным ящиком» понимают графическое изображение системы, внутреннее строение которой не рассматривается, изучаются лишь внешние связи — входы и результаты — выходы). Согласно принципу иерархической организации (или принципу интегративных уровней), для предсказания поведения системы не обязательно точно знать, каким образом построены ее компоненты. В частности, для прогнозирования будущего урожая на основе знаний структуры и функционирования агроценоза вполне удовлетворительное решение можно получить, используя агрегированные эмпирические модели, построенные на основе статистической обработки экспериментальных данных. Понятие равновесного состояния классической термодинамики адекватно стационарному состоянию необратимых процессов. Возможность применения законов термодинамики необратимых процессов применительно к агроценозу подтверждается условиями их функционирования.

Идею универсального показателя естественных производительных сил в конце 20-х гг. XX в. выдвинул В.И. Вернадский. Особое значение это имеет в земледелии, поскольку здесь, как правило, происходит накопление энергии. Следовательно, энергетическая оценка может служить общим критерием процессов для оценки как природных, так и агротехногенных процессов. Энергетические затраты в земледелии делят на прямые и косвенные. При рассмотрении энергетических потоков в сельскохозяйственном производстве энергетические эквиваленты отдельных приемов неравнозначны экономическим затратам. Они по-разному влияют на урожайность культуры, плодородие почвы, энергетический потенциал агроэкосистемы. По нашему мнению, все энергетические затраты необходимо классифицировать по трем группам.

Прямые кумулятивные затраты ($E_{ПКЗ}$). При выращивании культуры сюда относится энергетический эквивалент всех поступающих в почву минеральных и органических материалов, непосредственно влияющих на питание растений, улучшающих свойства почвы и повышающих ее энергетический уровень.

Косвенные кумулятивные затраты ($E_{ККЗ}$). Это энергетический эквивалент затрат труда, ГСМ, электроэнергии, твердых энергоносителей, пестицидов.

Косвенные технологические затраты ($E_{КТЗ}$). К данной категории затрат отнесены энергетические затраты на производство сельскохозяйственных машин и техники, стройматериалов, вспомогательной техники, они характеризуют технический уровень возделывания культур, севооборотов и системы земледелия в целом.

Рассмотрим предлагаемые показатели, позволяющие оценить параметры функционирования агроэкосистемы.

Коэффициент энергетической эффективности возделывания полевых культур ($K_{ЭЭ}$), который представляет отношение энергетического эквивалента урожайности культур ко всем категориям затрат ($E_{ПКЗ} + E_{ККЗ} + E_{КТЗ}$). $K_{ЭЭ}$ показывает энергетический эквивалент выращенной продукции, отнесенный к энергетическим затратам.

$$K_{ЭЭ} = \frac{Y}{E_{ПКЗ} + E_{ККЗ} + E_{КТЗ}}, \quad (1)$$

где $K_{ЭЭ}$ — коэффициент энергетической эффективности,

Y — энергетический эквивалент полученного урожая культур, МДж/га.

Биоэнергетический коэффициент (БЭК) — отношение энергетического эквивалента урожая к сумме энергетического эквивалента энергосодержащих материалов, поступающих в почву (удобрения, пожнивно-корневые остатки и др.). Он показывает количество энергии в продукции при учете энергетического эквивалента минеральных и органических удобрений, пожнивно-корневых остатков, сидератов, соломы и других видов ПКЗ.

$$БЭК = \frac{Y}{E_{ПКЗ}} \quad (2)$$

Коэффициент технологической нагрузки (КТН) — отношение энергетического эквивалента суммарных затрат материальных энергоносителей, влияющих на почву опосредованно ($E_{ККЗ}$), и энергетических затрат на производство сельскохозяйственных машин, техники, строительных материалов ($E_{КТЗ}$) к урожаю сельскохозяйственных культур. КТН показывает количество техногенной энергии на производство единицы энергии продукции.

$$КТН = \frac{E_{ККЗ} + E_{КТЗ}}{Y} \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия энергии почвы (КПД ЭП) — отношение энергетического эквивалента урожая сельскохозяйственной культуры к сумме энергетического эквивалента энергосодержащих материалов, поступающих в почву (удобрения, пожнивно-корневые остатки и др.), и энергетического эквивалента органического вещества почвы. КПД ЭП характеризует энергетическую эффективность использования органического вещества, которое имеется в почве и поступает в нее.

$$КПД ЭП = \frac{Y}{E_{ПКЗ} + E_{ОВ}} \quad (4)$$

где $E_{ОВ}$ — энергетический эквивалент органического вещества в почве, МДж/га.

Продемонстрируем важность учета растительных остатков в расчетах энергетической эффективности на примере четырех севооборотов и трех фонов минерального питания. В структуре затрат прямые кумулятивные затраты занимают более 90%, косвенные кумулятивные — 4–6, косвенные технологические — 1–2% (табл. 1). На всех культурах плодосменного севооборота без учета растительных остатков внесение органических и минеральных удобрений сопровождается снижением коэффициента энергетической эффективности и повышением затрат энергии на производство единицы продукции в среднем на 25–40%. Включение в расчет пожнивно-корневых остатков показывает несколько иные результаты, т.к. их энергоемкость значительно изменяет соотношение энергетических составляющих севооборота, снижая $K_{ЭЭ}$. БЭК дает представление о затратах прямой кумулятивной энергии на производство продукции.

Установлено, что увеличение срока пользования многолетними травами приводит к повышению затрат на единицу продукции без внесения удобрений на 14–25%, а при

внесение органических или минеральных удобрений энергетические затраты повышаются примерно в 10 раз. $K_{э}$ при этом снижается в 1,5–2,0 раза. Энергетически выгодно возделывание клеверов и многолетних трав одного года пользования на всех фонах питания. Затраты на возделывание озимой ржи в 3–3,5 раза менее эффективны, чем клеверов и многолетних трав одного года пользования. Самая низкая энергетическая эффективность отмечена при возделывании картофеля, особенно при внесении минеральных или органических удобрений.

В клеверах и многолетних травах одного года пользования 1 МДж энергии создает от 1,1 до 1,6 МДж продукции в виде сена. В посевах озимой ржи 1 МДж энергии создает от 0,14 до 0,24 единиц энергии урожая в виде зерна. Кроме того, критерий БЭК свидетельствует о том, что при внесении навоза менее эффективно используется органическое вещество, поступающее в почву. В целом по севообороту внесение минеральных и органических удобрений снижает использование энергетического материала почвы.

Показатель	Без остатков			С учетом остатков		
	Фон питания					
	0	NPK	Навоз	0	NPK	Навоз
1. $E_{ПКЗ}$, тыс. МДж/га	2,67	8,64	5,82	95,79	86,72	100,69
2. $E_{ККЗ}$, тыс. МДж/га	4,60	5,05	5,25	4,60	5,05	5,25
3. $E_{КТЗ}$, тыс. МДж/га	1,30	1,34	1,40	1,30	1,34	1,40
4. ВСЕГО затрат ($E_{СУМ}$), тыс. МДж/га	8,57	15,03	12,47	101,69	93,11	107,34
4. Получено с прод. (У), тыс. МДж/га	51,50	58,59	56,03	51,50	58,59	56,03
5. $K_{э}$	6,01	3,90	4,49	0,74	0,77	0,79
6. БЭК	11,19	11,60	10,67	0,81	0,83	0,87
7. КТН	0,11	0,10	0,12	0,11	0,10	0,12
8. КПД ЭП, %	15,68	17,57	16,70	12,19	14,27	13,11

Чем выше коэффициент технологической нагрузки (КТН), тем больше техногенная нагрузка на пашню. Наибольшая нагрузка наблюдается при выращивании картофеля, наименьшая — при возделывании многолетних трав, особенно клевера. КТН повышается при внесении органических удобрений.

Включение в расчеты растительных остатков более подробно характеризует энергетические потоки севооборота С1. Так, структура энергетических затрат в зерноотраважном севообороте (С2) по сравнению с севооборотом С1 свидетельствует об увеличении прямых кумулятивных затрат за счет пожнивно-корневых остатков (табл. 2). При этом энергозатраты на производство единицы продукции повышаются на 100–120%. Увеличение доли многолетних трав в севообороте приводит к снижению $K_{э}$.

Согласно расчетам, возделывание ячменя после многолетних трав третьего или четвертого года пользования неэффективно, т.к. увеличение прямых кумулятивных затрат не сопровождается эквивалентным повышением его урожайности. Соотношение структуры затрат во всех изучаемых севооборотах изменяется незначительно, но во втором севообороте хуже используется энергетический потенциал органического вещества, поступающего в почву.

Анализ энергетических составляющих и показателей энергетической эффективности севооборотов позволяет понять, почему $K_{э}$ и БЭК в бессменном картофеле несколько выше, чем в севообороте. Причина в том, что в севообороте энергетический материал, поступающий в почву под картофель, не обеспечивает эквивалентного повышения его урожайности.

Энергетический баланс возделывания полевых культур позволяет рассчитать предел урожайности, ниже которого производство продукции энергетически невыгодно, т.е. $K_{э} < 1,0$. Предел урожайности на фоне без удобрений составляет для зерновых 6–7 ц/га, клевера и многолетних трав на сено — 5–8, клубней картофеля — 45–70 ц/га. В сельскохозяйственном производстве, кроме технологических затрат возделывания культур, существуют общехозяйственные расходы, величина которых составляет 15–20% от всех затрат. Следовательно, в производственных условиях энергетический предел урожайности составит для зерновых 7–9 ц/га, для клевера и многолетних трав одного года пользования на сено — 6–9 ц/га, для картофеля — 55–85 ц/га.

Показатель	Фон питания		
	0	NPK	Навоз
Прямые кумулятивные затраты ($E_{ПКЗ}$)	91,71	88,97	133,05
Косвенные кумулятивные затраты ($E_{ККЗ}$)	2,9	3,22	3,38
Косвенные технологические затраты ($E_{ККЗ}$)	0,38	0,42	0,46
Получено с продукцией (У)	94,99	92,6	136,9
$K_{э}$	0,33	0,37	0,24
БЭК	0,34	0,39	0,24
КТН	0,03	0,04	0,03
КПД ЭП, %	4,42	4,37	5,81

Определенный интерес представляют результаты энергетического эквивалента баланса органического вещества в агроценозах, приходная часть которого представлена энергетическим эквивалентом гумуса, минеральных и органических удобрений, растительных остатков и семян. Разработана методика расчета коэффициента баланса энергетических потоков (КБЭП) севооборота. При условии учета энергетической составляющей всех земель сельскохозяйственного пользования его можно применять не только для севооборотов (агроэкосистем), но и для агроландшафта. При оценке многолетнего поступления энергии или анализе агроландшафтов разных регионов в приходной статье энергии целесообразно учитывать инсоляцию — поступление ФАР и альбедо солнечной энергии. В расходной статье учитывается урожайность основной, побочной продукции и минерализованный гумус (табл. 3).

Севооборот	КБЭП (органика: приход/расход) (без ФАР)		
	0	NPK	Навоз
С1 (зерноотраважнопропашной, 14,3% трав)	2,84	2,82	2,64
С2 (зерноотраважной, 80% трав)	5,36	7,89	7,38
С3 (зерноотраважной, 50% трав)	4,44	3,71	3,80
С4 (картофель бессменно)	1,34	1,81	1,48

Включение в статьи прихода и расхода энергетической составляющей солнца сглаживает их вариабельность, но закономерности соотношения баланса по культурам и фонам питания остаются прежними. В целом по севообороту С1 приход энергии без учета ФАР в 2,64–2,84 раза превышает ее расход. Наибольшая потеря энергии происходит в посевах картофеля. В севообороте С2 наблюдаются существенные различия приходной и расходной составляющих как по культурам, так и по фонам питания.

Значительные превышения прихода над расходом энергии в агроценозе установлены для трав второго-третьего года пользования и ячменя. В целом по зернотравяному севообороту в варианте без удобрений приход энергии в 5 раз превышает расхода. Внесение минеральных и органических удобрений увеличивает приходную часть почти в 8 раз.

Изучение баланса гумуса в севооборотах позволило установить, что увеличение расходной части энергии в агроценозах свыше 30% приводит к отрицательному балансу гумусу в севооборотах. Расширение банка энергетических данных позволит оптимизировать соотношение приходной и расходной частей энергетической составляющей при возделывании конкретной культуры, освоении севооборота или оценки функционирования хозяйства в целом.

Выражение всего органического вещества агроценоза и органического вещества почвы в энергетических величинах позволяет прогнозировать продуктивность культур и севооборотов на основании уравнения регрессии, представленного полиномом. Например, для картофеля плодосменного севооборота уравнение имеет вид:

$$y = 22,49 + 0,389x_1 - 0,0005x_2 + 0,213x_3 + 3,527x_4, \quad (5)$$

где y — урожайность, ц/га; b — коэффициенты уравнения; x_1 — сумма осадков за апрель-июль, мм; x_2 — энергетический эквивалент прямых кумулятивных затрат и органического вещества почвы, МДж/га; x_3 — содер-


жание доступного фосфора, мг/кг; x_4 — содержание калия в почве мг/кг.

Коэффициент детерминации сравнения теоретических и фактических величин показал существенную степень зависимости ($R^2 = 0,90—0,98$).

Заслуживает внимания выражение структуры агроценоза в энергетических величинах, позволяющее определить потенциальную продуктивность, оптимальное соотношение его консорбентов и другие показатели. Так, в посевах ячменя в варианте без сорняков количество накопленной энергии составляло 198365 МДж/га (табл. 4).

Таблица 4. Энергетический потенциал агроценоза ячменя, МДж/га

Вариант	Консорбент	МДж/га
Без сорняков	Культура	198365
	Сорные растения	119298
Сорняки до уборки	Сорные растения	79402
	Сумма (сорняки + культура)	198700

Сумма энергии компонентов засоренного агроценоза незначительно превышает агроценоз без сорняков. Это позволяет прогнозировать потенциальную продуктивность агроценоза и сравнивать ее с продуктивностью естественных фитоценозов. 

Резюме

Изучение закономерностей протекания процессов энерго-и массообмена в агроэко-системах под влиянием различных факторов позволит управлять ими и оптимизировать соотношение энергетической составляющей урожая, органического вещества в почве и других элементов баланса энергии и вещества адаптивно-ландшафтного земледелия. Потенциальная энергия солнца, антропогенные затраты и производство энергетического потенциала продукции оценивается в одних и тех же величинах, что даёт возможность количественно оценить производственную деятельность земледелия с энергетической точки зрения. Все энергетические затраты предлагается классифицировать по трём группам. Вводятся оценочные показатели, на основании которых можно оценить параметры функционирования агроэко-системы. Установлено, что для бездефицитного баланса гумуса отчуждение энергии в виде сельскохозяйственной продукции из агроэко-системы должно составлять до 30 %.

The study of regularities in energy and mass exchange behavior in agro and ecosystems under the influence of various factors allows controlling and optimizing the ratio of the yield energy value, the content of the organic matter in the soil and other elements of energy and matter balance in adaptive landscape farming. The potential energy of the Sun, anthropogenic expenses and energy potential produce are estimated in the same indices. It permits to evaluate quantitatively the production farming activity from the energy point of view. All energy spending is supposed to classify into three groups. One may introduce indices in value. According to them you are able to estimate the parameters of the agro and ecosystem functioning. It is found for the non-deficit humus balance to be kept the energy release out of agro and eco system is to amount up to 30 per cent.