

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ СПК «НЕЛЮБИНО»)

Проведён энергетический анализ функционирования агроэкосистемы «Нелюбино» (Томская область). Показано, что на территории Томской области в рыночных условиях, при резком снижении дотаций, искусственно «растянутое» сельское хозяйство особенно быстро пространственно сжимается. Установлено, что значительную долю энергетических затрат в хозяйстве составляет косвенная энергия, равная в среднем 70% от суммарных затрат энергии.

Ключевые слова: агроэкосистема; потоки энергии; эколого-энергетический анализ.

Развитие отечественного сельского хозяйства определяет продовольственное обеспечение населения России, и от этого в значительной степени зависит повышение уровня жизни населения и безопасности государства. Эффективное управление производством невозможно без использования энергетического анализа. Денежные оценки природных ресурсов неадекватно отражают их реальную стоимость, поскольку в них не учитывается вклад накоплений возобновляемых источников [1]. В условиях нарастающего дефицита энергетических ресурсов необходимо ввести экологическую составляющую в экономическую оценку, привести смешанные эколого-экономические показатели к одному эквиваленту – не денежному, а энергетическому, т.к. только в единицах энергии можно сопоставить ценность природных и экономических товаров и услуг [2]. Определение цены на сельскохозяйственную продукцию на основе энергетических затрат является наиболее адекватным. Энергетическая оценка, в свою очередь, помогает в осуществлении мероприятий, направленных на снижение затрат энергии.

Использование энергетического подхода позволяет выявить и изучить структурные и функциональные зависимости между компонентами сельскохозяйственных систем, а также исследовать в динамике влияние различных энергетических источников на поведение агроэкосистем [3].

Впервые идея энергетической оценки была предложена С.А. Подолинским (1881) и В.И. Вернадским (1928). Разработке метода энергетического анализа агроэкосистем посвящены работы отечественных авторов: Е.А. Денисенко (1995), Ю.М. Свиричева (1998), О.В. Фельдман (2000), В.М. Володина (2000), Г.А. Булаткина (2008) и др., а также зарубежных учёных: V. Smil (1983), W. Dazhong (1984), Д. Пиментеля (1984), Г. Одума (1996), J.P. Deleage (1997), J.C. Woodwell (1998), S.E. Jorgensen (2002) и др.

С использованием энергетического подхода к оценке эффективности функционирования агроэкосистемы (АГЭС) нами было исследовано Нелюбинское хозяйство, расположенное на территории Томского района Томской области.

Для оценки функционирования агроэкосистемы с помощью энергетического анализа решались самостоятельные, но взаимосвязанные задачи:

- анализ и оценка имеющихся подходов и методов исследования агроэкосистем;
- определение основных методологических положений эколого-энергетического анализа;
- представление структуры агроэкосистемы через потоки энергии или конвертируемые в энергию потоки;

- определение энергетической эффективности функционирования агроэкосистемы «Нелюбино»;
- анализ динамики структуры АГЭС по годам при различной энергетической нагрузке.

Методология эколого-энергетического анализа

Существование агроэкосистем основано на постоянном притоке энергии извне и её трансформации внутри системы, где происходит изменение её естественного энергетического состояния за счет дополнительной энергии, поступающей в систему в той или иной форме. Откликом системы на воздействие также является изменение энергетического состояния системы. В связи с этим появляется возможность выражения и сопоставления отдельных элементов системы в единых энергетических показателях. Концептуальная эколого-энергетическая модель АГЭС, рассматривающая преобразование входного потока искусственной энергии в выходной поток сельскохозяйственной продукции, должна удовлетворять ряду требований. Во избежание громоздкого описания сложного механизма связей между элементами системы переменные модели (потоки, структурные единицы) должны быть достаточно агрегированными. При таком подходе сложность внутреннего строения структурных единиц системы остается вне рассмотрения, что облегчает моделирование. Кроме потоков искусственной энергии, на вход в АГЭС поступает солнечная энергия, но поскольку особый интерес представляет исследование эффективности преобразования в системе потоков «искусственной» энергии, то выход потоков «естественной» энергии, например солнечной радиации, не рассматривается. В модели определяются существенные для системы материальные потоки и вычисляется их энергетический эквивалент. Энергетический эквивалент представляет собой суммарные затраты энергии (прямые и косвенные), израсходованные непосредственно на производство самого ресурса.

Для перевода в единые единицы конвертируем потоки вещества в энергетические (через их энергетические эквиваленты), как в работе Е.А. Денисенко [4]. Рассматривая АГЭС как преобразователь входных потоков искусственной энергии ($Q_1, \dots, Q_n, P_1, \dots, P_m$ – минеральные удобрения, электроэнергия, топливо, человеческий труд и т.д.), внутренних потоков ($x_1, \dots, x_u; y_1, \dots, y_2$ – корма, органические удобрения, солома) в выходные потоки произведённой сельскохозяйственной продукции ($q_1, \dots, q_v; p_1, \dots, p_s$ – зерно, мясо, молоко), мы описываем состояние АГЭС величинами потоков искусственной энергии, поступающей в неё за год.

Агроэкосистему рассматриваем как систему, состоящую из подсистем растениеводства Р и животноводства Ж. Между данными блоками происходит обмен энергетическими потоками (внутренними): из блока Р в блок Ж – потоки x_1, \dots, x_u , из блока Ж в блок Р – потоки y_1, \dots, y_z . Входные потоки в подсистему Р обозначаются через Q_1, \dots, Q_n , в подсистему Ж – через P_1, \dots, P_m . Соответственно, выходные потоки – q_1, \dots, q_v и p_1, \dots, p_s . Все выделяемые потоки участвуют в формировании структуры АГЭС.

Исходя из энергетических эквивалентов используемых ресурсов определяются энергетические затраты на производство продукции, а зная потребленную энергию на получение продукции и её энергосодержание, можно определить энергетическую эффективность производства.

Поток искусственной энергии в растениеводство Q_{in} рассчитывается по формуле: $Q_{in} = Q_{раст} + x_g$, где $Q_{раст}$ – часть потока, которая идёт на создание растительной продукции, потребляемой вне системы, а x_g – часть потока, которая используется для производства кормов.

Энергия произведённой растительной продукции, рассчитанная по калорийности, равна $q_{out} = q_{раст} + y_g$, где $q_{раст}$ – часть потока, которая потребляется вне АГЭС, а y_g – энергия кормов, поступающая в животноводство.

В дальнейшем для сравнения системы используется энергетическая эффективность всего растениеводства, которая определяется как отношение потока энергии на выходе q_{out} к потоку на входе Q_{in} и рассчитывается согласно формуле [4]: $\varepsilon_q = \frac{q_{out}}{Q_{in}}$. Входной поток энергии в

животноводстве P_{in} определяется по формуле $P_{in} = P_{ж} + x_g$, где $P_{ж}$ – поток искусственной энергии, а x_g – энергия, затраченная на производство кормов. Энергия произведённой продукции, рассчитанная по питательности кормов, равна $p_{out} = p_{ж} + x_g$. Показатель энергетической эффективности для животноводства определяется по формуле $\varepsilon_p = \frac{p_{out}}{P_{in}}$.

Энергетическая эффективность всей системы в целом рассчитывается по формуле [4]: $\varepsilon = \frac{q_{out} + p_{out}}{Q_{in} + P_{in}}$.

Для определения показателя энергетической нагрузки σ используется отношение величины энергетических затрат на входе в систему $E = Q_{in} + x_g$ к величине используемой сельскохозяйственной площади согласно формуле [4]: $\sigma = \frac{E}{S_{kul}}$.

Эколого-энергетический анализ СПК «Нелюбино»

СПК «Нелюбино», расположенное на территории Томской области Западно-Сибирского округа, специализируется на производстве зерна и мясо-молочной продукции; вместе с тем температурный режим и влагообеспеченность позволяют возделывать все сельскохозяйственные культуры, районированные в Томской области. Совхоз расположен в южной части таёжно-лесной зоны, которая характеризуется распространёнными разновидностями серых лесных почв. По агрономическим данным, почвы хозяйства обладают высоким плодородием, мощность гумусового горизонта до

35 см, содержание гумуса 5,12%. На пашне встречаются светло-серые лесные почвы. Комплексы разновидностей почв этого типа составляют 15,6% площади пашни. Сельскохозяйственные угодья занимают 58,7% общей площади совхоза. Структура сельскохозяйственных угодий в процентах составляет: пашня – 68,2, сенокосы – 17,2, пастбища – 14,6.

В условиях неустойчивой экономической ситуации в Нелюбино в структуре посевных площадей посевы зерна сократились на 42%, кормовых – на 18%, общая посевная площадь уменьшилась с 6476 га в 1991 г. до 3589 га в 2004 г., что привело к снижению валового сбора продукции. Обеспеченность техникой за данный период сократилась на 40%. Количество занятого в работах населения также сократилось в 2,4 раза: с 483 чел. в 1991 г. до 215 чел. в 2004 г.

В АГЭС «Нелюбино» в качестве основных входных энергетических потоков выделены следующие: прямая энергия – топливо (дизельное, бензин), электроэнергия, труд человека; косвенная энергия – удобрения (N, P, K), комбикорм, ядохимикаты, сельскохозяйственная техника, инфраструктура. Потоки на выходе: зерновые культуры, мясо и молоко.

Для реализации модели в СПК «Нелюбино» требовались следующие данные: посевные площади, га; урожай, т; урожайность, ц/га; вынос питательных веществ с продукцией по всем культурам (N, P, K), т; количество внесённых за 4 года питательных веществ с минеральными удобрениями (N, P, K), т; количество внесённых за 4 года питательных веществ с органическими удобрениями (N, P, K), т; баланс питательных веществ по удобрениям (N, P, K), т; потери гумуса, т (по культурам); баланс по гумусу, т; потребление в животноводстве корма (тонны переводим в тысячи кормовых единиц – тыс.к.ед.), а затем в перевариваемый сырой протеин (ПСП), т; баланс по кормам (тыс. к.ед. переводим в ПСП, т); затраты ресурсов в растениеводстве, ТДж; количество произведённой в растениеводстве продукции, ТДж/га; затраты на производство 1 тыс.к.ед.; затраты энергии в животноводстве, ТДж; количество произведённой в животноводстве продукции, ТДж; удельные затраты энергии в растениеводстве, ТДж; затраты энергии в животноводстве отдельно, ТДж.

Для агроэкосистемы «Нелюбино» были вычислены энергетические потоки в 1991, 1999 и 2004 гг. (см. табл. 1, 2). Схема энергетических потоков для «Нелюбино» в 2004 г. представлена на рис. 1. Энергетическое содержание потока «труд человека» очень мало (менее 0,1 ТДж) и поэтому не показано на схеме.

По годам основные энергетические показатели хозяйства изменялись следующим образом. Затраты искусственной энергии в 1991 г. в целом составляли 152,3 ТДж, в 1999 г. – 114 ТДж, в 2004 г. – 93,3 ТДж. Значительная доля энергетических затрат приходилась на косвенную энергию и составляла в среднем 70% от суммарных затрат энергии.

На долю косвенной энергии приходилось: в 1999 г. – 107,9 ТДж (70%), в 1999 г. – 76,5 ТДж (67%), в 2004 г. – 61,2 ТДж (66%). Поток искусственной энергии в растениеводство Q_{in} в 1999 г. был равен 120,1 ТДж, в 1999 г. – 94,2, в 2004 г. – 70,1 ТДж. Для производства кормов затраты энергии составили: в 1991 г. – 60,2 ТДж, в 1999 г. – 45,5, в 2004 г. – 37,3 ТДж. Энергия произведённой расти-

тельной продукции q_{out} , рассчитанная по калорийности, составляла: в 1991 г. – 216,2 ТДж, в 1999 г. – 178,1, в 2004 г. – 126,2 ТДж. Энергетическая эффективность всего растениеводства, определяемая как отношение выходного

потока энергии к входному, равна $\epsilon_q = 1,8$ (в энергетических единицах) для 1991 и 1999 гг. и 1,9 для 2004 г. То есть на одну единицу затраченной энергии приходилось 1,8 и 1,9 единиц растительной продукции.

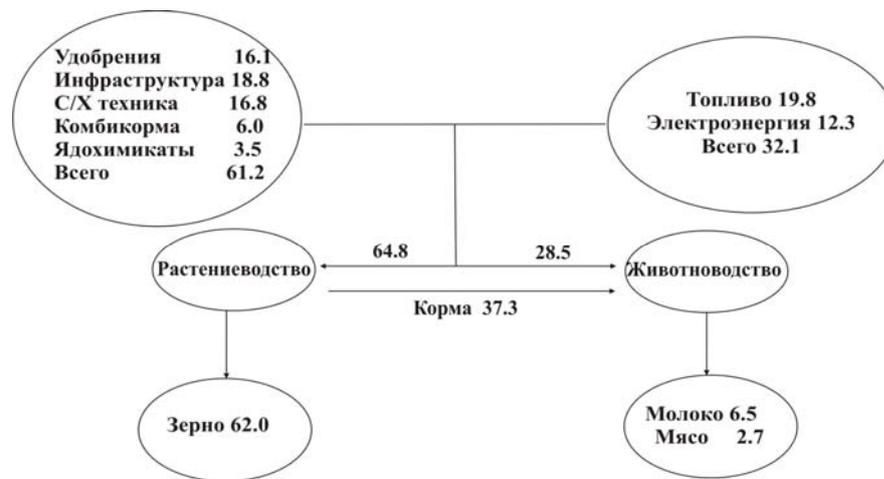


Рис. 1. Потоки энергии в АГЭС «Нелюбино» в 2004 г., ТДж (10^{12} Дж)

Таблица 1

Энергетический баланс растениеводства в АГЭС «Нелюбино», ТДж (10^{12} Дж)

Вид затрат	Вход			Вид продукции	Выход		
	Год				Год		
	1991	1999	2004		1991	1999	2004
Минеральные удобрения	30	16,7	16,1	Зерновые	102,4	88,1	62
Сельхозтехника	36	24	15,4	Сеяные травы	54,9	38,2	34,6
Топливо	31,6	25,9	19,8	Кукуруза на силос	46,1	30,9	20,1
Инфраструктура	20,4	26,1	10	Кормовые корнеплоды	12,8	10,2	9,5
Ядохимикаты	2,1	1,5	3,5				
Всего	120,1	94,2	64,8	Всего	216,2	167,4	126,2

Таблица 2

Энергетический баланс животноводства в АГЭС «Нелюбино», ТДж (10^{12} Дж)

Вид затрат	Вход			Вид продукции	Выход		
	Год				Год		
	1991	1999	2004		1991	1999	2004
Корма	60,2	45,5	42,6	Молоко	8,1	6,6	6,5
Инфраструктура	8,1	2,1	8,8	Говядина	4,8	3,2	2,7
Электроэнергия	12,3	11,3	12,3				
Сельхозтехника	2,0	1,2	1,4				
Топливо	0,5	0,6	0,7				
Всего	83,1	60,7	65,8	Всего	12,9	9,8	9,2

К основным выходным потокам АГЭС относятся: растительная продукция (зерновые): в 1991 г. – 102,4 ТДж, в 1999 г. – 88,1, в 2004 г. 62 ТДж; продукция животноводства: в 1991 г. – 13 ТДж, в том числе молоко – 8,2, говядина – 4,8 ТДж; в 1999 г. – 9,8 ТДж, в том числе молоко – 6,6, мясо – 3,2 ТДж; в 2004 г. – 9,2 ТДж, в том числе молоко – 6,5, мясо – 2,7 ТДж.

На вход в животноводство P_{in} в 1991 г. поступило 32,2 ТДж, в 1999 г. – 20,1, в 2004 г. – 28,5 ТДж энергии извне, а на производство кормов x_g затрачено 60,2 ТДж в 1991 г., 45,5 – в 1999 г. и 37,3 – в 2004 г. Выход продукции животноводства оценивается в 13 ТДж в 1991 г., 9,8 – 1999 г. и 8,5 – 2004 г.

Для основных отраслей сельского хозяйства были определены значения показателя энергетической эффективности. По полученным расчётам на одну единицу затраченной энергии приходится: 0,16 в 1991 г., 0,16 – в 1999 г., а в 2004 г. – 0,14 единиц животноводческой продукции в энергетическом эквиваленте. Общее количество продукции на выходе системы в целом составляет: в 1991 г. – 115,4 ТДж, в 1999 г. – 97,9 и в 2004 г. – 70,5 ТДж, и энергетическая эффективность ϵ всей системы в целом в 1991 г. равна 0,77, в 1999 г. – 0,8, в 2004 г. – 0,76. Показатели энергетической эффективности системы представлены на рис. 2.

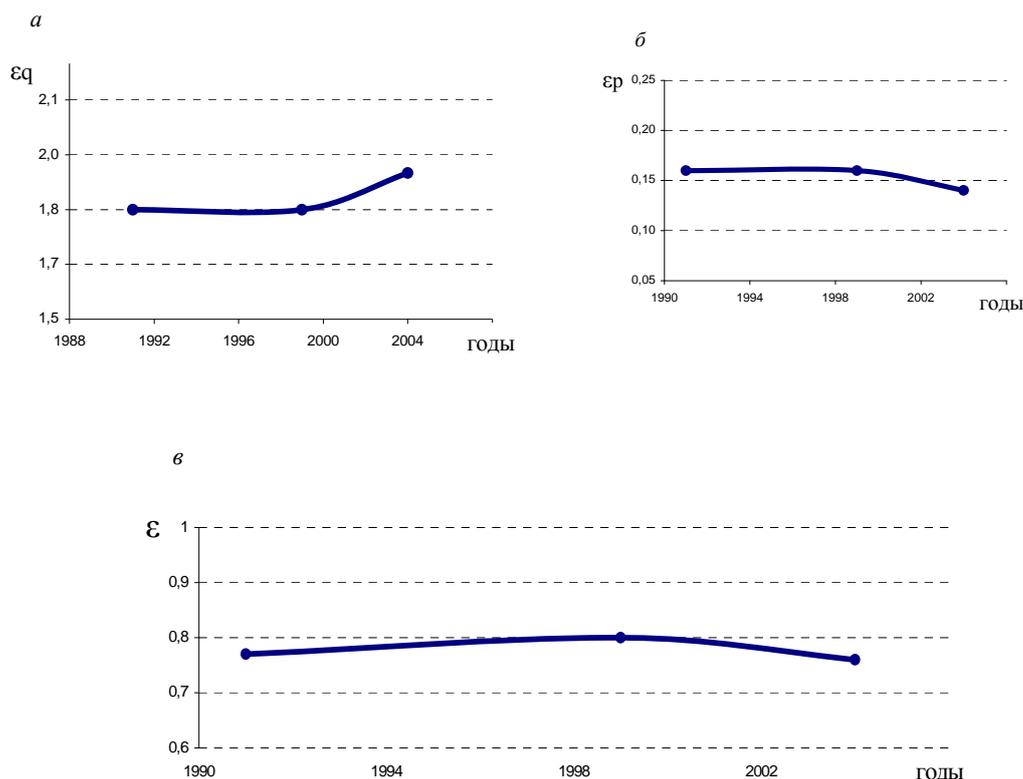


Рис. 2. Энергетическая эффективность АГЭС «Нелюбино»: *а* – растениеводства; *б* – животноводства; *в* – сельскохозяйственного производства в целом, где ϵ_q – энергетическая эффективность растениеводства, ϵ_p – энергетическая эффективность животноводства и ϵ – энергетическая эффективность сельскохозяйственного производства в целом

Как видно из рис. 2, на одну единицу затраченной энергии в среднем приходится 0,8 единиц сельскохозяйственной продукции. Динамика энергетической эффективности по годам отражает основные тенденции развития агропромышленного комплекса региона. Максимальное значение энергетической эффективности растениеводства в 2004 г. можно объяснить, во-первых, меньшими, по сравнению с предыдущими годами, удельными затратами на сельскохозяйственную технику и инфраструктуру и, во-вторых, структурой растениеводства. Энергетическая эффективность животноводства в 1991 и 1999 гг. составляла 0,16, что объясняется лучшей сбалансированностью АГЭС по кормам и меньшими удельными затратами на инфраструктуру. Энергетическая эффективность АГЭС в целом получилась ниже в 2004 г., что объясняется структурным соотношением между растениеводством и животноводством в системе.

В качестве показателя энергетической нагрузки взята величина энергетических затрат, отнесённая к величине используемой сельскохозяйственной площади. Значения данного показателя в энергетических единицах по годам таковы: 1991 г. – $23,5 \cdot 10^9$ Дж, 1999 г. – $25 \cdot 10^9$ Дж, 2004 г. – $26 \cdot 10^9$ Дж. За последние годы в хозяйстве наблюдается значительное увеличение энергетической нагрузки.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что на территории Томской области в новых ком-

мерческих условиях, при резком снижении дотаций искусственно «растянутое» сельское хозяйство начало особенно быстро пространственно сжиматься.

Таким образом, в функционировании АГЭС «Нелюбино» наблюдается системный эффект, суть которого заключается в том, что соединение элементов в систему позволило получить дополнительное приращение продукции (в нашем случае солома, отходы переработки пошли на корм скоту, а навоз использовали в качестве удобрения). Ограниченность энергетических ресурсов становится на современном этапе одним из факторов, вынуждающих к экономичному развитию сельского хозяйства.

Данный метод позволяет рассчитать затраты антропогенной энергии и энергии природных ресурсов для производственной системы в целом, а не покомпонентно. Методологическая ценность такого подхода заключается в том, что при этом оцениваются затраты энергии в более объективной форме в отличие от стоимостных показателей, для которых характерна субъективность.

При обычных методиках расчет энергетических затрат производится на основании нормативных затрат ресурсов при различных сельскохозяйственных операциях, тогда как данная методика позволяет определять энергетические потоки на основании данных о реальных, сложившихся в конкретном году затратах ресурсов и производстве продукции. Поэтому она представляется более адекватной для сравнения между собой нескольких хозяйств

или отделений хозяйства. Кроме того, требуемые при этом фактические данные невелики по объему. Они содержатся в основных отчетных документах хозяйства.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что сельское хозяйство Томской области является принципиально дотационным и требует постоянных вливаний со стороны государства, т.к. находится в сложных природно-климатических условиях. Однако в настоящее время государственные дотации для поддержания АПК составляют лишь 1–2% , в то время как на развитие промышленности расходуется 6–7%. Если рассматривать развитие сельскохозяйственной системы на длительную перспективу, то, в силу ограниченной

ёмкости среды, она неизбежно будет деградировать. Для прогрессивного ее развития необходимо разрабатывать новые технологии получения энергии из возобновляемых ресурсов.

К снижению энергопотребления в сельском хозяйстве могут привести перевод техники на дизельное топливо и сокращение операций при обработке полей [5]. Кроме того, лишь часть производимой в хозяйстве биомассы составляет сельскохозяйственная продукция, остальное – побочный продукт и отходы, которые в настоящее время практически не используются, что представляет существенный резерв повышения эффективности АГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков А.В. Стратегии российских реформ. Томск, 1998. 324 с.
2. Одум Г., Одум Э. Энергетический базис человека и природы. М.: Прогресс, 1978. 380 с.
3. Свирижев Ю.М., Денисенко Е.А. Эколого-энергетический анализ агрогеосистем // Геосистемный мониторинг. Структура и функционирование геосистем. М.: АН СССР, 1986. С. 209–227.
4. Denisenko E.A. Agroecosystem analysis approach based on the flows of artificial energy and information. International institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, 1995. 14 p.
5. Чернов К.В. Экономико-экологическая эффективность систем обработки почвы в различных агроландшафтах: Дис. ... канд. экон. наук. Саратов, 2000. 162 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 27 июля 2009 г.