

УДК 502.52:504.03:[330.15+631.1]

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМ – ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поздняков А.В., Семенова К.А., Фузелла Т.Ш.

ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», Томск,
e-mail: synergeia.pol@gmail.com

В статье излагаются результаты анализа функционирования агроэкосистем с использованием энергетической меры затрат (Дж) труда человека, включая техногенный вклад; вклад природных энергетических ресурсов, как составной части агроэкосистемы, так и внешних источников поступления энергии (преимущественно солнечной энергии и климатических ее источников). Предложен краткий алгоритм энергетического анализа геосистем. Показаны результаты энергетической оценки агрохозяйств, функционирующих в разных климатических условиях, что позволяет оценивать и сопоставлять энергетическую эффективность природно-климатических и экономических ресурсов. На примере анализа энергетической эффективности функционирования агрофирмы Томской области построена потоковая модель агроэкоэкономической замкнутой структуры. В рамках предложенной методологии проведены некоторые расчеты. Авторами определено, что при научно обоснованном и рациональном управлении на основе оптимизации системы затраты энергии в фермах Томской области можно существенно сократить. На примере анализа энергетической эффективности функционирования хозяйства степной зоны Казахстана получены практические результаты. Так, определена естественная экономия энергии, создаваемая за счет выпадения атмосферных осадков. Рассчитана наиболее реальная величина внесения органических удобрений для поддержания плодородия темно-каштановых почв. Показана энергетическая эффективность внедрения биогазовых технологий в функционирование хозяйства на основе использования органических отходов хозяйства с одновременным производством органо-минеральных удобрений. Установлено, что использование энергетической оценки в сочетании с экономической объективно показывает сущность происходящих социально-экономических процессов и раскрывает действительные затраты труда на производство товаров и услуг, по существу являющиеся неразделимым трудом Человека и Природы. Наиболее рентабельным является переход к управлению агроэкономической системой как целостной самоорганизующейся структурой, функционирующей на принципах операциональной замкнутости.

Ключевые слова: агроэкоэкономическая система, энергетическая оценка, энергетическая мера, эффективность функционирования, эколого-экономическая эффективность

ENERGY-BASED ANALYSIS OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFECTIVENESS OF AGROECOSYSTEMS – THE FIRST RESULTS

Pozdnyakov A.V., Semenova K.A., Fuzella T.Sh.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: synergeia.pol@gmail.com

The article describes the results of the analysis of agroecosystems, conducted using the energy-based measure (J) of human labor. This includes technogenic input and the contribution of natural energy resources – both from internal resources of the agroecosystem and external energy supply (coming mainly from solar energy and other climatic sources). The short algorithm of energy analysis of geosystems is proposed. The results of agroecosystems energy evaluation in different climatic conditions are shown, that allows assessing and comparing the energy efficiency of natural-climatic and economic resources. In particular, based on analysis of energy efficiency of functioning of farm Tomsk region the flow-oriented model of the agroecosystem as operationally closed structure has been developed. Under the proposed methodology some calculations carried out. With use science-based and rational-based management system optimization of energy costs in the agroecosystems of the Tomsk region can be reduced. Based on analysis of energy efficiency of functioning of agro-ecosystems of a steppe zone of Kazakhstan practical results have been obtained. Accordingly the natural savings of energy generated through precipitation has been defined. The most real value of organic fertilizer to maintain the fertility of dark chestnut soils in the energy measurement is assessed. The energy efficiency of biogas technology implementation in the functioning of the economy based on the use of organic waste of agriculture with the simultaneous production of organo-mineral fertilizers have been showed. The use of energy assessment, in combination with economic, objectively reflects the essence of the ongoing social-economic processes and reveals the true labor costs of production. The most promising is the transition to managing agroecosystems as complex self-organizing structure working on the principles of operational introversion.

Keywords: agroecosystem, energy assessment, energy measure, efficiency of functioning, ecological and economic efficiency

Неоспоримым является факт, что в экономике природопользования не учитывается вклад природы в материальное производство. Между тем современная жизнь доказывает, что экономическая деятель-

ность человека становится выгодной только в том случае, когда больший вклад вносит природа: она концентрирует энергию и вещества, преобразуя их в другие формы, необходимые для создания разнообразных

геосистем; возобновляет израсходованные запасы вещества и энергии, и в том их состоянии, при котором сохраняется и поддерживается установившееся динамическое равновесие. И все же эффективность функционирования компаний обычно определяется соотношением себестоимости конечной продукции к ее рыночной стоимости; отношением прибыли к себестоимости, прибыли к площади территории. При таком подходе производительность труда завышается, приводя к парадоксальному результату: стоимость продукции, несмотря на возрастающие энергетические затраты на ее производство, понижается, свидетельствуя о якобы высокой рентабельности предприятия.

Согласно теории рыночной экономики, стоимость продукции устанавливается по соотношению спроса и предложения, в котором опосредованно учитываются затраты труда (энергии). На рынке выигрывает тот, чья продукция, при одной и той же рыночной цене, имеет наименьшую себестоимость. Снижение же ее в значительной мере обуславливается продуктивностью природных ресурсов либо уровнем концентрации полезных элементов, прежде всего содержанием в них энергии – с одной стороны, а с другой – количеством затрачиваемой энергии на производство продукции. Прогрессивное социально-экономическое развитие объективно предполагает нелинейное увеличение затрат энергии.

Весь опыт развития цивилизации подтверждает, что ВВП государств возрастает пропорционально затрачиваемой энергии. В экономически развитых странах расходы энергии на одного человека в сутки превышают $1,13 \cdot 10^9$ Дж [1]; суммарное потребление первичной энергии человечеством оценивается величиной $5,56 \cdot 10^{20}$ Дж в год [2] и продолжает возрастать.

В статье излагаются результаты анализа функционирования агроэкосистем с использованием энергетической меры затрат (Дж) труда человека, включая техногенный вклад; вклада природных энергетических ресурсов, как составной части агроэкосистемы и внешних источников поступления энергии (преимущественно солнечной энергии и климатических ее источников).

*Базисные положения
энергетического анализа
агроэкосистем и постановка задачи*

Движущей силой динамических процессов является энергия, пространственные потоки которой есть не что иное, как суть

процессов термодинамики – необратимое движение ее от источников аккумуляции к источникам диссипации. Универсальной научно обоснованной оценкой труда, в том числе и «работы природы», является энергетическая мера, которая не зависит ни от конъюнктуры рынка, ни от политических реалий.

Использование единой энергетической меры позволяет проводить сравнительный анализ вкладов в производство материальных ценностей природы и трудозатрат человека; энергетически оценивать экологическую емкость экосистем, функционирующих в разных природно-климатических условиях.

В основе методологии лежит анализ потоков природной и антропогенно преобразованной энергии с целью составления энергетического бюджета функционирования рассматриваемого хозяйства (в данном случае агроэкосистем).

Известно, что потоки природной энергии подразделяются на постоянно действующие (солнечная энергия, тепловая энергия Земли, энергия приливов и отливов), возобновляемые (энергия атмосферных осадков, кинетическая энергия текучих вод и ветровых потоков, энергия биомассы, энергия почвенного плодородия), невозобновляемые (энергия углеводородов и ядерного распада). Отдельную группу составляют альтернативные источники энергии, преимущественно поступающие из отходов сельскохозяйственного производства и других различных видов промышленности.

Для анализа потоков используемой в агроэкосистемах природной энергии составляются карты плотности по пространственному ее распределению [3]. Затем определяются потребности в природной энергии различных агроэкосистем и составляется фактический баланс энергии, учитывающий, с одной стороны, потребности человека (в Дж/год), а с другой – объективно действующие природные типы энергетических потоков, позволяющие в той или иной мере удовлетворять их.

*Энергетическая мера
эколого-экономической эффективности
функционирования агроэкосистем (АГЭС)*

Исследование проводилось на примере агрохозяйств, располагающихся в двух природно-климатических зонах: таежной (Томская область) и степной (Казахстан, Карагандинская область). В работе использованы результаты проводившихся ранее исследова-

ний по государственным программам фундаментальных исследований СО РАН: Проект VII.63.1.3 и Проект VIII.77.1.4.

Агроэкосистемы Томской области

На примере анализа энергетической эффективности функционирования агрофирмы Томской области была построена потоковая модель агроэкосистемы как операционально замкнутой структуры [4]. В ее основу положена система объектов с заложенными в нее свойствами и функциями, а также концептуальное положение о том, что блоки АГЭС (растениеводство, животноводство), блок управления и инфраструктуры связаны между собой, с их выходными характеристиками и с внешней средой потоками энергии, вещества и информации. Таким образом, изменение параметров любой части агроэкосистемы обуславливало изменение параметров всех функционально связанных ее элементов. Выходные характеристики в виде отходов и побочных продуктов производства поступали в соответствующий блок их переработки с целью получения дополнительной энергии и материалов (в данном случае в виде органоминеральных удобрений).

Для анализа функционирования агроэкосистем было выбрано девять районов Томской области с достаточно развитой транспортной инфраструктурой. Исследование базировалось на статистических данных, взятых из ежегодных сборников по сельскому хозяйству за период с 2005 по 2010 гг. (таблица).

Было выявлено, что самую высокую нагрузку несут Томский, Кожевниковский и Зырянский районы, имеющие соответственно следующие значения в энергетическом эквиваленте: $61,7-69,8 \cdot 10^{13}$ Дж; $54,5-66,9 \cdot 10^{13}$ Дж; $21,1-28,8 \cdot 10^{13}$ Дж. Максимальные показатели по количеству используемых базисных (природных) источников энергии в виде органических удобрений и кормов имеют Томский, Чанский, Первомайский и Асиновский районы (соответственно $44,5-62,3 \cdot 10^{13}$ Дж; $7,7-9,3 \cdot 10^{13}$ Дж; $10,1-16,4 \cdot 10^{13}$ Дж и $7,4-16,5 \cdot 10^{13}$ Дж).

Энергетическая оценка результатов функционирования агроэкосистемы степной зоны Казахстана

Физико-географические условия степной зоны (Карагандинская область) характеризуются резко континентальным климатом с дефицитом естественного увлажнения – количество осадков не превышает 350 мм

в год. Земельные угодья представлены темно-каштановыми почвами и маломощными черноземами, растительный покров – степным разнотравьем. Изученная агроэкосистема, площадью более 2000 га, ежегодно получает солнечную энергию в количестве 52323 ГДж/га, или 1250 т/год в нефтяном эквиваленте; она трансформируется в энергию, накапливаемую растительностью, почвой и др. компонентами геосистем.

В работе взята в расчет преобразованная солнечная энергия, накопленная растениями, далее трансформированная в природное почвенное плодородие и запасенная в природных ископаемых топливах. Так, 1 га засеваемой зерновыми культурами земли степной зоны усваивает в среднем 21 ГДж/год солнечной энергии, а общая сумма заготавливаемой фермой энергии составляет более 42000 ГДж. За один сезон хозяйство собирает в среднем 4 т/га соломы, содержащей 57,6 ГДж/га, заготавливает более 1000 т сена энергетической ценностью $14,6 \cdot 10^{12}$ Дж, из которых более 250–350 тонн ($3,65 \cdot 10^{12}-5,1 \cdot 10^{12}$ Дж) расходуется на кормление животным, а часть реализуется для приобретения других видов кормов [5].

С урожаем выносятся из почвенного покрова большинство питательных веществ, что приводит к необратимым процессам деградации плодородного слоя. Для предотвращения этой проблемы, как известно, необходимо вернуть в почву минеральные вещества путем внесения удобрений, содержащих их. С этой целью по методике А.С. Миндрин [6] определена мера внесения естественных питательных удобрений для обогащения темно-каштановых почв; в единицах энергии она составляет 3,7 ГДж/га, что суммарно дополняется затратами на транспортирование и введение в почву. Таким образом, вычислена энергия вносимого органического удобрения, возмещающая ущерб плодородию почвы, связанный с изъятием питательных веществ с урожаем.

Влияние солнечной энергии на атмосферу Земли обуславливает выпадение атмосферных осадков, что приводит к интенсивности образования облаков. Известно, что обесцененная тепловая энергия переносит водяной пар и участвует в кругообороте воды на Земле. Часть рассеиваемой в пространство тепловой энергии обратно вовлекается в систему в виде выпадающих осадков; она с собой поднимает водяной пар, формирующий облака, который при накоплении преобразуется в дождь и снег, т.е. трансформируется вновь в энергию.

Затраты энергии при оптимизации потенциальных возможностей использования побочных продуктов сельхозпроизводства в некоторых районах Томской области, 10^{13} Дж*

Район / Год	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Асиновский	20,77/15,17	23,22/7,48	17,90/15,35	17,57/13,64	17,99/15,48	17,87/14,34
Бакчарский	15,64/11,3	16,71/8,71	15,36/9,08	15,12/4,77	15,54/6,42	15,26/5,53
Зырянский	27,75/8,27	27,86/7,46	26,66/8,36	28,82/8,08	28,24/8,49	21,13/18,41
Кожевниковский	66,92/14,09	54,54/14,08	54,89/15,27	64,74/16,56	60,49/16,58	60,55/16,91
Кривошеинский	17,91/6,89	16,58/11,09	16,89/10,81	18,03/10,95	15,72/11,40	15,45/11,34
Первомайский	16,51/13,41	16,51/12,41	16,59/12,32	14,33/12,95	15,98/10,09	16,01/10,28
Томский	69,84/44,46	61,72/58,21	63,11/57,98	64,52/62,31	68,33/60,47	68,33/60,47
Чаинский	11,51/9,32	11,03/9,12	11,59/9,16	10,99/8,63	10,29/8,43	9,52/7,72
Шегарский	20,73/13,21	21,49/16,41	21,25/7,25	22,65/8,87	21,97/6,68	22,28/7,14

Примечание. *Представлены суммарные затраты энергии к энергии биогаза и удобрений (/).

Естественное увлажнение земельных угодий сохраняет прежде всего невозобновляемые природные ресурсы и антропогенную энергию, так как в районах с недостаточным количеством осадков орошение земель – занятие энерго- и трудоемкое.

В ходе исследования выявлена создаваемая выпадением атмосферных осадков в степной зоне Центрального Казахстана экономия энергии; она определена по методике [1] и составляет 16,4 ГДж/га. Создание систем искусственного орошения в засушливых районах требует на 2–3 порядка выше энергозатрат на строительство и их эксплуатацию с внедрением большего числа источников энергии, чем при естественном увлажнении сельскохозяйственных земель.

По вышеприведенным расчетам экологическая емкость рассмотренной агроэкосистемы составляет в энергетических единицах $10,47 \cdot 10^{16}$ Дж/год, по существу это количество энергии представляет природную ренту, дающую естественную экономию энергоресурсов в хозяйственной деятельности, которую зачастую не берут в оценку затрат [7].

Помимо потоков природной энергии, в исследовании учитываются суммарные затраты энергии (прямые и косвенные): физический труд человека, электроэнергия, энергия твердых и жидких топлив, кормовых ресурсов, а также затраты на содержание основных средств производства. Расчеты показывают, что на производственный процесс затрачивается более 59185 ГДж/год; на содержание оборудования и помещений расходуется не менее 5163 ГДж/год (в среднем 30% от затрат на создание основных фондов); итого энергозатраты в год составляют 64348 ГДж/год. Суммарный

энергетический выход продукции в животноводстве равен 5600 ГДж/год.

Авторами статьи потери энергии в сельхозпредприятиях определяются разницей между затраченной энергией и энергией полученной продукции. Таким образом израсходовано в агроэкосистеме 64348 ГДж, произведено сельскохозяйственной продукции 5600 ГДж (9% от суммарных энергозатрат), трансформационные издержки, следовательно, равны 58748 ГДж (91%) энергии.

В разведении животных и получении сельскохозяйственной продукции существенным энергоемким вкладом природы остаются кормовые ресурсы, количество которых напрямую зависит от биопродуктивности экосистем. Остальные статьи затрат не превышают 36,6% от общих энергетических вложений. Вклад энергии физического труда человека по сравнению с другими вложениями природно-антропогенной энергии ничтожно мал.

Расчеты показали, что производство одной единицы сельскохозяйственной продукции требует затрат 11,4 единиц производственных затрат, из них на долю трудовых ресурсов приходится 0,3%; затраты электроэнергии составляют 1,1%; на дополнительные материалы расходуется 5,2%; затраты энергии на содержание основных фондов – 8%; расход жидкого и твердого топлива составляет 21,9%; кормовых ресурсов – 63,4% [5].

С целью сокращения производственных энергозатрат авторами апробировалось внедрение в структуру агроэкосистемы инновационных биогазовых технологий. По полученным данным в хозяйстве ежегодно образуется от 950 до 1000 тонн сельскохозяйственных отходов, что в переводе на энергию биогаза соответствует 4249 ГДж/год

с учетом эксплуатационных расходов и производственных потерь биоустановки, составляющих не менее 30 % от всей производимой энергии. Суммарные потребности хозяйства в энергии, расходуемой на отопление административных помещений, нагрев воды на хозяйственные нужды и электроэнергию, ежегодно достигают 5845 ГДж (данные 2005 г.).

Учитывая собственные энергопотребности биоустановки (например, биогазовая когенерационная установка 40–50 % энергии преобразуется в тепловую, а 30–40 % – в электрическую энергию) и производственные потери, анализ показывает, что использование биогаза дает возможность перекрыть расходы на отопление помещений, нагрев воды и электроэнергию более чем в половину в зависимости от модификации установки.

Таким образом, внедрение в фермерские хозяйства биогазовых установок позволяет одновременно решить основные проблемы: экологическую в виде полной утилизации отходов животноводства; энергетическую путем получения и утилизации биогаза; агрохимическую (получение удобрений); социальную (улучшение условий труда и создание новых рабочих мест) и экономическую (снижение платежей и получение прибыли от реализации удобрений).

Выводы

Согласно проведенным исследованиям установлено, что в отдельные годы некоторые из агрохозяйств в районах Томской области почти на три четверти могли обеспечивать свои потребности в энергии за счет использования побочных продуктов производства, одновременно производя легко усваиваемые органоминеральные удобрения.

Тогда как в степной зоне Казахстана потребности энергии могли быть восполнены более чем в половину за счет получения тепловой и электрической энергии биогаза из отходов агропроизводства.

Вследствие этого наиболее экономически выгодным и экологически безопасным направлением решения проблем энергетической эффективности функционирования агроэкосистем становится внедрение в структуру фермерских хозяйств технологий анаэробной переработки отходов с получением биогаза и качественных обеззараженных удобрений.

Апробированная на примере агроэкосистем, функционирующих в таежной и степной зонах, методология позволяет проанализировать перспективы внедрения дополнительных

энергоресурсов с учетом емкости территории для увеличения результативности производства сельскохозяйственной продукции. Фактическая результативность агрокомпаний в основном определяется именно энергетическим вкладом экосистем, так как с увеличением его доли эффективность производства растет. А значит, следует сконцентрировать основное внимание на решении предполагающих возрастание природной энергии задач, таких как сохранение бонитета почв, повышение эффективности использования возобновляемых энергоисточников, внедрение безотходных технологий.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований СО РАН IX.135.1.

Список литературы

1. Odum Howard T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision-making / Howard T. Odum. – N.-Y., 1996. – 370 p.
2. BP Statistical Review of World Energy. 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 31.01.18).
3. Волкова Е.С., Мельник М.А. Энергетическая характеристика возобновляемых природных ресурсов региона средствами ГИС (на примере Томской области) // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 2. – С. 148–153.
4. Фузелла Т.Ш. Эколого-энергетический анализ агроэкосистем: оптимизация функционирования. Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken, Germany, 2012. – 168 с.
5. Шуркина К.А. (Семенова К.А.) Анализ функционирования агроэкосистем с позиции энергетического подхода: на примере крестьянского хозяйства «СО Мер-2»: дис. ... канд. географ. наук. – Томск, 2009. – 150 с.
6. Миндрин А.С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции: дис. ... докт. экон. наук. – М., 2003. – 294 с.
7. Чесноков В.С. С.А. Подолинский: концепция социальной энергетики // Век глобализации. – М., 2010. – № 2. – С. 181–187.

References

1. Odum Howard T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision-making / Howard T. Odum. N.-Y., 1996. 370 p.
2. BP Statistical Review of World Energy. 2017 [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (data obrashhenija: 31.01.18).
3. Volkova E.S., Melnik M.A. Jenergeticheskaja harakteristika vozobnovljaemyh prirodnyh resursov regiona sredstvami GIS (na primere Tomskoj oblasti) // Uspehi sovremennogo estestvoznanija. 2016. no. 2. pp. 148–153.
4. Fuzella T.Sh. Jekologo-jenergeticheskij analiz agrojekosistem: optimizacija funkcionirovanija. Lambert Academic Publishing. Saarbrucken, Germany, 2012. 168 p.
5. Shurkina K.A. (Semenova K.A.) Analiz funkcionirovanija agrojekosistem s pozicii jenergeticheskogo podhoda: na primere krestjanskogo hozjajstva «SO Mer-2»: dis. ... kand. geograf. nauk. Tomsk, 2009. 150 p.
6. Mindrin A.S. Jenergojekonomicheskaja ocenka selskohozjajstvennoj produkcii: dis. ... dokt. jekon. nauk. M., 2003. 294 p.
7. Chesnokov V.S. S.A. Podolinskij: koncepcija socialnoj jenergetiki // Vek globalizacii. M., 2010. no. 2. pp. 181–187.