



УДК 502.52(631.1)+504.03(330.15)  
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.83>

## **Энергетический анализ функционирования агроэкосистем в условиях естественного насыщения: первые результаты**

А. В. Поздняков

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск  
Томский государственный университет, Томск*

К. А. Семенова, Т. Ш. Фузелла

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск*

**Аннотация.** Приводится методика исследования геосистем, функционирующих с насыщением. Представлены принципы и положения методологии самоорганизации геосистем, предложен краткий алгоритм энергетического анализа геосистем. Показаны результаты энергетической оценки агроэкосистем, действующих 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 агроэкосистемы как операционально замкнутой структуры. Авторами определено, что при научно обоснованном и рациональном управлении на основе оптимизации системы затраты энергии в агроэкосистемах Томской области можно существенно сократить. В рамках представленной методологии для степной зоны Казахстана определена естественная экономия энергии, создаваемая за счет выпадения атмосферных осадков, рассчитана наиболее реальная величина органических удобрений для поддержания плодородия темно-каштановых почв. Установлено, что применение энергетической оценки в сочетании с экономической объективно отображает суть происходящих социально-экономических процессов и раскрывает истинные затраты труда на производство продукции, по существу являющиеся неразделимым результатом деятельности человека и природы. В статье ставятся задачи для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** агроэкосистема, энергетическая оценка, системный подход, самоорганизация геосистем, обратные связи, динамика с насыщением, динамика с обострением.

**Для цитирования:** Поздняков А. В., Семенова К. А., Фузелла Т. Ш. Энергетический анализ функционирования агроэкосистем в условиях естественного насыщения: первые результаты // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 83–96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.83>

### **Введение**

Любой вид человеческой деятельности становится тем более рентабельным, чем больший вклад в производство вносит природа: она концентрирует энергию и вещества, преобразует их в новые формы, доступные для образования различных геосистем; восстанавливает израсходованные запасы вещества и энергии, и в той их форме, при которой поддерживается и сохраняется установившееся динамическое равновесие. Тем не менее эф-

фективность функционирования предприятий оценивается по соотношению себестоимости конечной продукции и ее рыночной цены; отношением прибыли к себестоимости; отношением прибыли к площади земельных угодий и др. Такой подход предполагает искажение действительных затрат на производство продукции. Производительность труда, по сравнению с действительной, завышается, что приводит к парадоксальному результату – стоимость продукции, несмотря на возрастающие энергетические затраты на ее производство, понижается, свидетельствуя о якобы высокой рентабельности производства.

Этот общепринятый подход опирается на теорию рыночной экономики: цена продукции устанавливается по соотношению спроса и предложения, в котором опосредованно учитываются затраты труда (энергии). На рынке выигрыш получает тот, чья продукция при одной и той же рыночной цене имеет наименьшую себестоимость. Снижение же себестоимости в значительной мере обуславливается продуктивностью природных ресурсов или 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.

Современная методология природопользования практически не учитывает вклад природы в производство материальных ценностей. Их стоимость в лучшем случае увязывается с трудом, затрачиваемым на изъятие природного ресурса, и спросом на рынке. Между тем в результатах человеческой деятельности доля вкладываемой собственной энергии в производство продукта несравнимо меньше доли энергетических затрат экосистем. Весь опыт развития цивилизации подтверждает ставший очевидной истиной факт – ВВП государств возрастает пропорционально затрачиваемой на свое развитие энергии. В промышленно развитых странах расходы энергии на одного человека в сутки превышают  $1,13 \cdot 10^9$  Дж [Odum, 1996]; затраты энергии на поддержание достигнутого состояния неравновесности колоссальны: суммарное потребление энергии человечеством оценивается, по разным источникам, величиной от  $2,7$  до  $4,5 \cdot 10^{20}$  Дж в год [Акимова, Хаскин, 2006] и продолжает возрастать. По умолчанию полагается, что нет пределов экономического и техногенного развития; считается аксиомой, что прогрессивное развитие цивилизации должно характеризоваться возрастанием производства материальных ценностей по законам обратных положительных связей, т. е. согласно известной закономерности  $dM/dt = rM(t)$ , где  $M$  – количество материальных ценностей; затраты энергии на производство; разнообразие видов производимых для нужд цивилизации материалов и пр.,  $r$  – коэффициент, характеризующий прирост системы по ее основным показателям. Но такое социально-экономическое развитие есть все более удаляющееся от равновесия, но не прогрессивное.

### **Проблемы методологии исследования процессов взаимодействия в системе «человек – природа»**

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 [Акимова, Хаскин, 2006; Миндрин, 2003; Odum, 1996]. Есть только одна универсальная научно обоснованная мера затрат труда, в том числе и «труда природы» в различных формах его проявления, – это энергетическая мера (энергия), жизненная значимость которой неизменна и не зависит ни от конъюнктуры рынка, ни от политических пристрастий. Энергетическая мера является единственной из всех известных, которая объективно отображает вклады в производство продукции человеческого труда, применяемой им техники и вклад природы. Она позволяет оценить реальную стоимость природных ресурсов, например почвы и растительности, атмосферных осадков и пр., и только с помощью энергетической меры можно сравнить эффективность функционирования разнородных систем – природных, промышленных, сельскохозяйственных.

Энергетический анализ обеспечивает возможность не только сравнивать вклады природы с вкладами человека в производство материальных ценностей, но и определять энергетические потоки в различных системах, сопоставлять их по эффективности использования ресурсов, оценивать устойчивость функционирования любых систем (биологических, экономических, социальных и пр.). Энергетическая оценка позволяет сверять экологическую емкость экосистем, функционирующих в разных природно-климатических условиях, проследить их пространственную изменчивость, а также количественно определять вносимую в производство конечной продукции долю антропогенной и природной энергии. В зависимости от изменения климатических условий вклад антропогенной и природной энергии варьирует, и эти значения особенно важны для анализа потоков внутри экосистемы. Сравнение выходного и входного энергетических потоков позволяет выявить потери в процессе природопользования, установить действительные показатели расхода энергоресурсов.

*Условия насыщения – естественные и регулируемые параметры*

Процессы насыщения в динамике природных процессов закономерны и имеют фундаментальное значение в принципах взаимодействия в системе «человек – природа». Применительно к антропогенной деятельности в целом, и в особенности в отношениях ее с экологическими процессами, выделяются следующие виды насыщения:

– *динамика с насыщением* в экосистемах – регулируется через систему обратных отрицательных связей, безраздельно действующих через границы территории (ее размеры), климатические и энергетические природно-ресурсные параметры (см., например [Pozdnyakov, 2013]);

– *динамика с обострением* (преимущественно в социально-экономических системах) – регулируется преобладающим действием целенаправленно организуемой системы обратных положительных связей, предполагающих ускоряющееся (экспоненциальное) развитие и удаление ее от динамически равновесного (режима с насыщением) состояния.

Цивилизация в виде отдельных государств и в целом развивается на принципах безусловного действия обратных положительных связей, предполагающих, по существу, кумулятивный рост ее параметров, интегрально

характеризующихся нарастающими затратами энергии  $E$  по времени ( $t$ ) и пространству ( $S$ )  $dE/dt = kdE(t)$ : чем больше товаров в целом и по разнообразию производится в текущее время, тем больше их производится в последующие времена.

Вся социально-экономическая политика стран современной цивилизации направлена на непрерывное увеличение валового национального продукта, сопровождающееся расширением инфраструктуры производства, увеличивающимися затратами энергии и сокращением экологической емкости  $V$ , играющей роль предела роста системы. В силу объективного действия законов термодинамики направленность развития цивилизации в целом и по частям (государств в отдельности) к своему пределу является фатально необратимой! Нельзя остановиться на любом из достигнутых уровней развития, поскольку для его поддержания потребуются, хотя и в уменьшенном виде, все более возрастающие затраты энергии при одновременном сокращении ее запасов. Иллюзорные попытки решить проблему за счет использования возобновляемой энергии для высокоразвитой промышленно-индустриальной цивилизации входят в противоречие с законами развития.

#### *Геоэкосистема и инвариант структуры функциональных отношений (ИСФО)*

С утилитарной точки зрения, не только в прямом прикладном значении природных ресурсов, но и их рациональном использовании и сохранении, в экологической емкости  $V(t)$  выделяется ее часть – *инвариант*  $J(t)$  структуры функциональных отношений, энергетически выражающийся в Дж/год [Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017; Поздняков, Шуркина, 2008; Pozdnyakov, 2013]. Он состоит из минимально необходимой для образования и устойчивого функционирования экосистемы совокупности экологических элементов и социума, его инфраструктуры, территории, характеризующейся экологической емкостью ( $V$ ) и площадью ( $S$ ).

При отсутствии хотя бы одного из составляющих ИСФО элементов система теряет устойчивость, способность к самовосстановлению, самовоспроизведению и разрушается. Применительно к агроэкосистемам ИСФО представляет собой неаддитивное (эмерджентное) объединение в целостность элементов экосистемы, социально-экономической системы с ее инфраструктурой. В таком случае система не может устойчиво функционировать без действия рекурсивных связей, состоящих из обратных потоков вещества, энергии и информации (МЕИ), благодаря чему она приобретает качества самоорганизующейся операционально замкнутой системы.

Для основных показателей, характеризующих динамику экосистемы, вводится энергетическая единица измерения:

- скорость энергии, накапливаемой в экосистеме  $\Delta N(t)$ , Дж/год;
- суммарная энергия, накопленная экосистемой за характерное время  $T$  ее формирования (в течение голоцена):  $E = N \cdot T$ , Дж/тыс. лет;
- энергия, накопленная инвариантом системы за характерное время,  $J(t)$  Дж/тыс. лет;
- скорость энергии, накопленной инвариантом  $\Delta j(t)$ , Дж/год;

– доля расходуемой в процессе человеческой деятельности энергии из накопленной экосистемой в границах ( $S$ ,  $m^2$ ) рассматриваемой территории  $Me(t)$ , Дж/год.

Из данных положений следует, что  $\Delta Me(t) \leq \Delta N(t) - \Delta J_{пр}(t)$  характеризует избыточную величину производимой экосистемой энергии, избытка которой в процессе социально-экономической деятельности не несет ущерба для устойчивого экологического развития. Во всех случаях процессы развиваются с насыщением. В начальную фазу развития оно происходит по экспоненте, в заключительную – переходит в динамически равновесное состояние, когда прирост энергии  $\Delta N(t) - \Delta Me(t) \approx 0$ . Процесс, по существу, является не только термодинамическим, но еще, в отличие от физических систем, и спонтанно обратимым. Учитывая данные обстоятельства, необходимо создать условия, при которых процессы в агроэкологических системах протекали бы подобным образом:  $\Delta N(t) - \Delta J_{пр}(t) \approx 0$  (знак « $\approx$ » означает среднестатистический баланс энергии).

### **Энергетический анализ функционирования агроэкосистем в условиях естественного насыщения: первые результаты**

Основоположителем энергетического подхода к анализу динамики геосистем, включая и хозяйственную социально-экономическую деятельность, является выдающийся американский ученый-эколог Говард Одум, изложивший методологию этого подхода в фундаментальном труде «Бухгалтерия окружающей среды» [Odum, 1996]. Методологические подходы Г. Одума основаны на оценке всех энергетических потоков в системе с целью составления энергетического бюджета геосистемы. Определенный вклад в развитие этой методологии внесен российскими учеными [Поздняков, 2010; Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017; Поздняков, Шуркина, 2008; Семенова, 2013; Фузелла, 2012; Pozdnyakov, 2013]. Делаются попытки применения данной методологии и для оценки эффективности функционирования разного рода социально-экономических систем.

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 углеводородного и ядерного сырья) и пр. В отдельную группу выделены альтернативные источники энергии (преимущественно отходы производства и биомассы), использование которых увеличивает общий энергетический потенциал геосистемы и ведет к сокращению отходов производства. Каждый выделенный вид потока энергии геосистемы (например, биомасса, горючие ископаемые, почвенное плодородие, водная и ветровая энергия и др.) количественно и качественно анализируется, приводится к энергетической единице измерения, и на этой основе составляются карты пространственного изменения плотности энергии [Фузелла, 2012]. Такие карты являются основой для количественного районирования территории по пространственному измене-

нию плотности природной энергии, что позволяет регламентировать природопользование по ее энергетической емкости [Odum, 1996].

Методологию анализа функционирования эколого-экономических систем на настоящем этапе изучения данной проблемы проще рассматривать на примере исследования динамики агроэкосистем (АГЭС). Согласно предложенной нами классификации [Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017; Поздняков, Шуркина, 2008], агроэкосистемы относятся к самоорганизующимся структурам типа «человек – машина». Как любое созданное человеком автоматическое устройство, они организуются человеком и могут устойчиво функционировать только при его непосредственном участии в обмене веществом и энергией, в определении набора животных и растительных видов. Без участия человека самоорганизация и саморегулирование агроэкосистемы невозможны. Но вместе с тем, в отличие от искусственных экосистем (фитокамер, теплиц, оранжерей), они не могут функционировать и без участия природы. Прямые и косвенные затраты, в том числе и труд человека, выступают в роли своего рода катализатора, повышающего естественный коэффициент полезного действия фотосинтеза и продуктивности животных и микроорганизмов. Таким образом, АГЭС, по существу, являются социальными эколого-экономическими системами, на примере организации и функционирования которых разрабатывается методология оптимального будущего развития всего общества.

Отличительной особенностью АГЭС, как и других типов социально-экономических систем, в силу исторически сложившегося мировоззрения является отсутствие в них управляющих процессов, научно обоснованно ограничивающий рост продуктивности. Входные управляющие параметры в абсолютном большинстве организуемых человеком систем, включая АГЭС, направлены на увеличение выходных параметров, осуществляющееся на основе действия обратных положительных связей. Именно такое развитие, предполагающее неограничиваемый рост производства вещей – консюмеризм – по количеству и разнообразию предметов потребления и производства мусора, в наше время считается прогрессивным. Если этого не происходит, то предприятия и государство в целом относят к числу маргинальных.

*Краткий алгоритм расчета потоков энергии в АГЭС:*

- вычисляются потребности различных отраслей хозяйства, которые в большей степени зависят от запланированного выхода продукции;
- определяется фактический баланс источников энергии;
- балансы сводятся в одно уравнение, в левой части которого потребности человека, а в правой – необходимые для их удовлетворения энергетические потоки.

Это уравнение разрешается относительно суммы величин энергии и вещества (выраженных также в энергетических единицах), поступающих из внешних источников. Энергия, поступающая в АГЭС из среды, представляет собой энергию не только топлива, но и удобрения с кормами, поэтому значение целевой функции, отражающей сумму потребленной внешней энергии, будет больше либо равным величине закупаемой энергии.

В частности, на примере анализа энергетической эффективности функционирования агрофирмы Томской области была построена потоковая модель агроэкосистемы как операционально замкнутой структуры [Фузелла, 2012]. В ее основу положена система объектов с определенными свойствами и функциями, а также концептуальное положение о том, что блоки АГЭС (растениеводство, животноводство и др.) связаны между собой, а также с внешней средой потоками энергии, вещества и информации. Неотъемлемой частью системы является блок управления и инфраструктуры. Особенность модели: изменение параметров любой части модели влечет за собой изменение параметров связанных с ней элементов и энергии на выходе; другой особенностью является возможность введения элемента переработки побочных продуктов и получения дополнительного количества энергии внутри системы.

Предлагаемая модель оптимальна для функционирования, так как позволяет варьировать различными блоками. Возможные варианты использования биомассы растениеводства и животноводства осуществляются в блоке управления в соответствии с целями, оптимизирующими функционирование всей системы в целом. При построении модели агроэкосистемы ставилась задача – найти вариант распределения внутренних потоков, который минимизирует потребность системы во внешних источниках энергии при фиксированном количестве продукции на выходе из системы.

Для расчета энергии, производимой сельским хозяйством на территории Томской области, были выбраны районы с хорошей освоенностью и транспортной доступностью. В анализ были включены следующие из них: Томский, Асиновский, Бакчарский, Кожевниковский, Кривошеинский, Зырянский, Чаинский, Шегарский и Первомайский. Исследование базировалось на статистических данных по сельскому хозяйству в период с 2005 по 2010 г. по различным районам области; данные были взяты из ежегодных сборников. Было выявлено, что максимальную энергетическую нагрузку имеют Томский ( $61,7-69,8 \cdot 10^{13}$  Дж), Кожевниковский ( $54,5-66,9 \cdot 10^{13}$  Дж) и Зырянский ( $21,1-28,8 \cdot 10^{13}$  Дж) районы [Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017] (табл.).

Самые высокие значения по количеству используемых базисных (природных) источников энергии в виде органических удобрений и кормов имеет Томский район ( $44,5-62,3 \cdot 10^{13}$  Дж), уступают ему Чаинский ( $7,7-9,3 \cdot 10^{13}$  Дж), Первомайский ( $10,1-16,4 \cdot 10^{13}$  Дж) и Асиновский ( $7,4-16,5 \cdot 10^{13}$  Дж).

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в отдельные годы Томский (2005–2010), Асиновский (2007–2010) и Первомайский районы (2005–2008) способны более чем на 70 % к самообеспечению энергией за счет использования побочного продукта производства. По результатам анализа оптимизации, потенциальные возможности использования побочных продуктов производства для самообеспечения энергией иногда превышают 50 % (для Чаинского и Кривошеинского районов), а в Шегарском и Бакчарском районах они составляют 25 %. Динамика распределения энергетических затрат по годам объясняется различием в объеме производства, в структуре сельскохозяйственных площадей и эффективности хозяйствования. В целом на основе оптимизации системы затраты энергии можно сократить до 50 % в год [Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017].

Таблица

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

\*Представлены суммарные затраты энергии и отношение их к энергии биогаза и удобрений (/).

Интересные научно-теоретические и практические результаты получены в других исследованиях, проведенных [Поздняков, Шуркина, 2008; Поздняков, Фузелла, Семенова, 2017] на примере анализа энергетической эффективности функционирования агроэкосистемы степной зоны Казахстана.

*Энергетический вклад природы.* Физико-географические условия степной зоны (Карагандинская область Республики Казахстан) характеризуются резко континентальным климатом, с недостаточным увлажнением – количество осадков не превышает 350 мм в год. Территория покрыта маломощными черноземами и темно-каштановыми почвами, растительный покров – степное разнотравье. Рассмотренная агроэкосистема с площадью более 2000 га ежегодно получает солнечную энергию в количестве 52 323 ГДж/га, или 1250 т/год в нефтяном эквиваленте; солнечная энергия трансформируется в энергию, накапливаемую растительностью, почвой и другими компонентами геосистем.

В научных исследованиях энергетических источников развития экосистем и экономической деятельности принято выделять солнечную энергию в отдельный вид, по рангу сравнимый с энергией человека, потенциальной энергией, накапливаемой растениями или почвой [Акимова, Хаскин, 2006; Миндрин, 2003; Чесноков, 2010]. В работе учтена лишь трансформированная солнечная энергия, усвоенная растениями, преобразованная в природное плодородие почвенного покрова и содержащаяся в природных ископаемых топливах. В частности, аккумуляция энергии растительностью определяется площадью земли, засеваемой зерновыми культурами и травами. Так, на 1 га земли, засеваемой зерновыми культурами, накапливается в среднем 21 ГДж [Поздняков, Шуркина, 2008], а суммарная величина получаемой энергии составляет 42 000 ГДж. За один сезон хозяйство собирает в среднем 4 т/га соломы, содержащей 57,6 ГДж/га.

Для оценки вклада природы в деятельность сельскохозяйственного предприятия выявлена экономия энергии, создаваемая за счет выпадения



осадков в степной зоне Центрального Казахстана; она определена по методике [Odum, 1996] и составляет 16,4 ГДж/га. Также рассчитана наиболее реальная величина внесения органических удобрений для поддержания плодородия темно-каштановых почв; в энергетическом измерении она составляет 3,7 ГДж/га [Поздняков, 2010; Поздняков, Шуркина, 2008].

В показателе «энергетический вклад человека» учитываются суммарные затраты энергии (прямые и косвенные): на каждой последующей стадии ко всей энергии, затраченной на предыдущих стадиях, прибавляется энергия, затраченная на вновь создаваемый продукт [Там же].

Расчеты показывают, что на производственный процесс затрачивается 59 185 ГДж/год; на содержание оборудования и помещений ежегодно расходуется не менее 5163 ГДж/год (в среднем 30 % от затрат на создание основных фондов). Вместе с затратами на содержание суммарные энергозатраты за год составили 64 348 ГДж/год. Суммарный энергетический выход в животноводстве достигал 5600 ГДж/год.

Считается, что потери энергии в агроэкосистемах определяются разностью между использованной энергией и энергией полученной продукции. В нашем случае израсходовано в животноводстве 59 185 ГДж, получено 5600 ГДж (9 % от суммарных энергозатрат), трансформационные потери составляют 53 585 ГДж (91 %) энергии. Большая часть израсходованной энергии – это природная энергия, которую зачастую не берут в оценку затрат.

В работе обоснована энергетическая и экономическая эффективность внедрения биогазовых технологий в функционирование хозяйства на основе использования органических отходов хозяйства с одновременным производством органо-минеральных удобрений. Проведенные исследования показали, что при использовании биогаза, получаемого из отходов агропроизводства, можно покрыть расходы на отопление хозяйственно-бытовых помещений, нагрев воды и электроэнергию на 80–85 % в зависимости от эксплуатационных издержек биоустановки (без учета окупаемости установки).

### **Концептуальная модель функционирования АГЭС**

Существующая методология организации сельскохозяйственных предприятий предполагает истощительное земледелие; в структуре современных АГЭС нет элементов управления, которые бы по достижении некоторого научно обоснованного и практически проверенного уровня продуктивности (до  $J$  Дж/год, см. выше) демпфировали бы дальнейший рост производительности системы. По достижении этого уровня (пороговых значений) предприятие должно переходить преимущественно на интенсивные методы земледелия, предполагающие совместную с экосистемами деятельность, направленную к росту их продуктивности и устойчивости. Деятельность предприятия должна быть антиэнтропийной по отношению к экосистеме, в которой оно располагается, так как энергетический вклад ее в производство конечной продукции является определяющим.

*Механизм действия отрицательной обратной связи в структуре АГЭС.* Введение в структуру АГЭС нового управляющего элемента предполагает смену ее целевых функций и принципиальное изменение аттрактив-

ной цели ее развития. Если в традиционных вариантах их организационной структуры формирование цели полностью определяется собственными интересами и рынком, то при новом механизме управления необходимо учитывать отношения «спрос – предложение» и в экосистемах, как ни покажется это на первый взгляд парадоксальным. Существующий в экосистеме «спрос» состоит в том, чтобы ее инвариант структуры по крайней мере не разрушался и соответствовал бы требованиям  $\Delta N(t) - \Delta J_{пр}(t) \approx 0$ , играющим роль обратной отрицательной связи.

*Заданное состояние системы АГЭС.* Заданное (задаваемое, сознательно планируемое) состояние АГЭС – это уровень, который она по истечении некоторого установленного промежутка времени должна достичь по своим выходным характеристикам: количеству и качеству выпускаемой продукции, структуре функциональных отношений, формам и количеству потребляемых веществ, информации и энергии. В качестве заданного состояния могут выступать не только количественные характеристики экосистем, но и численность населения, занятого в производстве, материальное состояние и социальное положение людей и др. Однако социально-экономические системы, в отличие от всех других типов систем, определяют свое заданное состояние сами. Переход на новые принципы организации производства предполагает кардинальное изменение отношения к выходным характеристикам АГЭС. Во-первых, повышается статус АГЭС – она из разряда экономических переходит в категорию эколого-экономических систем. Во-вторых, качественно меняются ее выходные характеристики: кроме рентабельности производства, вводятся показатели устойчивости и продуктивности экосистем, с учетом биологического разнообразия. Цель состоит в том, чтобы происходило гармоничное взаимопроникновение (пересечение) систем, предполагающее одновременное и взаимосвязанное улучшение их состояния. Необходимо перевести ту часть экосистемы, которая входит в границы действующей АГЭС, на принципы «спрос – предложение – выход». Причем выход, как и спрос и предложение, определяется в энергетическом измерении. В качестве предложения со стороны экосистемы в энергетических эквивалентах выступают плодородие почв, уровень загрязненности водных бассейнов и подземных водных источников, биопродуктивность лесопарковых зон и др.

Когда предельные состояния заданы ( $J_{пр}(t)$ ), то насыщение осуществляется пропорционально разности между заданным и текущим  $j(t)$  состояниями; а когда характеристики предельного состояния системы формируются спонтанно, то процесс протекает пропорционально разности между суммарным накоплением энергии  $N(t)$  в экосистеме и суммарными ее расходами  $Me(t) - (N(t) - J_{пр}(t)) \approx 0$ .

Научно-теоретическая и прикладная значимость исследований в рамках кратко изложенной методологии энергетического анализа агроэкосистем очевидна. Учитывая полученные результаты, в дальнейшем планируется вести исследования в соответствии с определенным алгоритмом, опирающимся на следующие базисные положения:

- 1) единицы измерения энергии  $E$  – Дж; время  $t$  – год; площадь  $S$  – м<sup>2</sup>;

2) количественная оценка основных потоков энергии, создаваемых природными процессами, – Дж/год на единицу площади  $S$ ;

3) количественная оценка потоков энергии, создаваемых антропогенной деятельностью с использованием различных техногенных процессов;

4) аналитическая обработка статистического материала по производству и использованию энергии в генетически разнородных источниках и накопителях энергии; определение эффективности ее использования в территориально-производственных комплексах, в том числе в АГЭС;

5) характеристика энергетического бюджета экосистем по основным природным компонентам для количественной оценки экологической емкости территории (по количеству населения, животных, запасам энергии);

6) картографическое отображение плотности пространственного распределения потенциальной энергии (аккумулируемой экосистемами);

7) карты плотности используемой энергии Дж/м<sup>2</sup> в год социально-экономической системой в результате совокупной производственной деятельности.

Первая и последние два из базисных положений относятся к числу важнейших и трудоемких фундаментальных направлений научных исследований, так как, не имея данных о скорости аккумуляции и расходов энергии, невозможно провести сравнительную характеристику эффективности ее использования в процессах создания материальных ценностей. Например, по абсолютной величине накопленной энергии в Дж/м<sup>2</sup> на единице площади лесная экосистема превосходит степную или любую луговую. Сравнение же их по относительным величинам (в Дж/год·м<sup>2</sup>) показывает, что луговая экосистема по энергетической производительности превышает лесную.

### **Выводы**

Энергетический анализ функционирования агроэкосистем объективно отображает суть происходящих социально-экономических процессов и раскрывает истинные затраты труда на производство продукции, по существу являющиеся неразделимым результатом деятельности человека и природы. Энергетическая оценка эффективности производственной деятельности АГЭС позволяет не только сравнивать хозяйства различной производственной специализации, функционирующие в конкретных природных условиях, но и количественно определять долю вносимого труда (энергии) человеком и природой. Естественно, что с позиций рассмотренной методологии действительная эффективность производства определяется энергетическим вкладом экосистем – с увеличением его доли эффективность производства растет. В производстве продукции, прежде всего сельскохозяйственной, следует отдавать предпочтение решению тех задач, которые предполагают возрастание энергетического вклада природы: увеличению потенциальной продуктивности почв, получению энергии в замкнутом цикле производства, использованию отходов производства, предварительно прошедших переработку, например с помощью микробиологических технологий, повышению эффективности использования солнечной энергии (увеличению плотности энергии) и пр.

Наиболее перспективным является переход к управлению агроэкосистемой как целостной самоорганизующейся структурой, функционирующей на принципах операциональной замкнутости.

Таким образом, из полученных результатов и базисных положений следует, что человек в своей деятельности, увы, не накапливает энергию, как это предполагается [Чесноков, 2010]. Исследования, проводимые по предложенному алгоритму и предложенной модели изучения агроэкосистем, по своей сложности и трудоемкости, объему анализируемого фактического материала, теоретическому обобщению, наконец по научно-теоретической и практической значимости требуют значительных затрат времени, финансовых и материальных средств. Тем не менее они того стоят.

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

### Список литературы

- Акимова Т. А., Хаскин В. В.* Экономика природы и человека. М. : Экономика, 2006. 334 с.
- Миндрин А. С.* Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2003. 294 с.
- Поздняков А. В.* Демократия, меритократия и ноократия в решении общегосударственных проблем // Мир и Россия: регионализм в условиях глобализации : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 11–12 нояб. 2010 г. М., 2010. Ч. 1. С. 106–122.
- Поздняков А. В., Фузелла Т. Ш., Семенова К. А.* Энергетическая оценка функционирования агроэкосистем с насыщением и задачи исследования // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 25–29 сент. 2017 г. Иркутск, 2017. С. 130–134.
- Поздняков А. В., Шуркина К. А.* Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Вестн. Том. гос. ун-та. 2008. № 316. С. 206–212.
- Семенова К. А.* Количественная оценка биоэнергетического потенциала Томской области // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 323, № 4. С. 179–185.
- Фузелла Т. Ш.* Эколого-энергетический анализ агроэкосистем: оптимизация функционирования. Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2012. 168 с.
- Чесноков В. С.* С. А. Подолинский: концепция социальной энергетики // Век глобализации. 2010. № 2. С. 181–187.
- Odum Howard T.* Environmental accounting: EMERGY and environmental decision-making. N. Y., 1996. 370 p.
- Pozdnyakov A. V.* Self-regulation of the floodplain geosystem – dynamics with saturation // Journal of Wetlands Biodiversity / Museum of Braila Department of Natural Sciences – Istros Publishing House of the Museum of Braila. 2013. Vol. 3. P. 77–89.

## Energy Analysis of Agroecosystems Functioning in Conditions of Natural Saturation: the First Results

A. V. Pozdnyakov

*Institute of Climatological and Ecological System SB RAS, Tomsk  
Tomsk State University, Tomsk*

K. A. Semenova, T. S. Fuzella

*Institute of Climatological and Ecological System SB RAS, Tomsk*

**Abstract.** In the paper the study's results of dynamics functioning of the agro-ecosystems in the natural saturation conditions are given. The principles and provisions of the methodology of geosystems self-organization are presented, 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. Hence, with use science-based and rational-based management system optimization of energy costs in the AGES of the Tomsk region can be reduced to 50 % per year. For the steppe zone of Kazakhstan the natural savings of energy that has been generated through precipitation is 16.4 GJ/ha. The most real value of organic fertilizer to maintain the fertility of dark chestnut soils in the energy measurement is 3,7 GJ/ha. 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. In the article the technique of research of geosystems functioning with saturation has been considered, the challenges for further research are set.

**Keywords:** agroecosystem, energy assessment, system approach, self-organization of geosystems, feedbacks, saturation dynamics, dynamics with exacerbation.

**For citation:** Pozdnyakov A.V., Semenova K.A., Fuzella T.Sh. Energy Analysis of Agroecosystems Functioning in Conditions of Natural Saturation: the First Results. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 23, pp. 83-96. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.23.83>. (in Russian)

## References

- Akimova T.A., Haskin V. V. *Ekonomika prirody i cheloveka* [Economy of Nature and Human Being]. Moscow, 2006, 334 p. (in Russian)
- Mindrin A.S. *Energoekonomicheskaya otsenka selskokhozyaistvennoi produkcii: diss. doctora ekon. nauk* [Energy-Economic Evaluation of Agricultural Products. Dr. sci. diss.]. Moscow, 2003, 294 p. (in Russian)
- Pozdnyakov A.V. Demokratiya, meritokratiya i nookratiya v reshenii obshchegosudarstvennykh problem. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Mir i Rossiya: regionalizm v usloviyah globalizatsii"* [Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "The World and Russia: Regionalism in the Context of Globalization"]. Moscow, 2010, vol. 1, pp. 106-122. (in Russian)
- Pozdnyakov A.V., Fuzella T.Sh., Semenova K.A. Energeticheskaya otsenka funktsionirovaniya agroekosistem s nasyshcheniem i zadachi issledovaniya [Energy Assessment of the Functioning of Agroecosystems with Saturation and Research Objectives]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Bezopasnost prirodo-polzovaniya v usloviyah ustojchivogo razvitiya"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Safety of nature management in conditions of sustainable development"]. Irkutsk, 2017, pp. 130-134. (in Russian)
- Pozdnyakov A.V., Shurkina K.A. Novyi metodologicheskii podkhod k analizu funktsionirovaniya agroekosistem [A New Methodological Approach to the Analysis of the Functioning of Agroecosystems]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2008, no. 316, pp. 206-212. (in Russian)
- Semenova K.A. Kolichestvennaya otsenka bioenergeticheskogo potentsiala Tomskoi oblasti [Quantitative Estimation of Bioenergy Potential of Tomsk Region]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2013, vol. 323, no. 4, pp. 179-185. (in Russian)
- Fuzella T.Sh. *Ekologo-energeticheskii analiz agroekosistem: optimizatsiya funktsionirovaniya*. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012. 168 p.
- Chesnokov V.S. S.A. Podolinskii: kontseptsiya sotsialnoi energetiki [The Concept of Social Energy by S.A. Podolinsky]. *Vek globalizatsii* [Globalization Studies]. Moscow, 2010, no. 2, pp. 181-187. (in Russian)
- Odum Howard T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision-making. N. Y., 1996. 370 p.

Pozdnyakov A.V. Self-regulation of the floodplain geosystem – dynamics with saturation. *Journal of Wetlands Biodiversity*. Museum of Braila Department of Natural Sciences, Istros Publishing House of the Museum of Braila, 2013, vol. 3, pp. 77.

*Поздняков Александр Васильевич*  
доктор географических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
лаборатория самоорганизации геосистем  
Томский государственный университет  
Институт мониторинга климатических  
и экологических систем СО РАН  
Россия, 634055, г. Томск,  
пр. Академический, 10/3  
тел.: (3822) 49-22-23  
e-mail: synergeia.pol@gmail.com

*Pozdnyakov Alexandr Vasilievich*  
Doctor of Science (Geography),  
Professor, Chief Researcher, Laboratory  
of Self-Organizing of Geosystem  
Tomsk State University  
Institute of Climatological and Ecological  
System SB RAS  
10/3, Akademicheskyy av., Tomsk, 634055,  
Russian Federation  
tel.: (3822) 49-22-23  
e-mail: synergeia.pol@gmail.com

*Семенова Ксения Алексеевна*  
кандидат географических наук,  
научный сотрудник, лаборатория  
самоорганизации геосистем  
Институт мониторинга климатических и  
экологических систем СО РАН  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академиче-  
ский, 10/3  
тел.: (3822) 49-22-23  
e-mail: ksenia\_ska@mail.ru

*Semenova Kseniya Alexeevna*  
Candidate of Sciences (Geography),  
Researcher, Laboratory of Self-Organizing  
of Geosystem  
Institute of Climatological and Ecological System  
SB RAS  
10/3, Akademicheskyy av., Tomsk, 634055,  
Russian Federation  
tel.: (3822) 49-22-23  
e-mail: ksenia\_ska@mail.ru

*Фузелла Татьяна Шалвовна*  
кандидат географических наук,  
научный сотрудник, лаборатория  
самоорганизации геосистем  
Институт мониторинга климатических и  
экологических систем СО РАН  
Россия, 634055, г. Томск,  
пр. Академический, 10/3  
тел.: (3822) 49-22-23  
e-mail: fts10@yandex.ru

*Fuzella Tatyana Shalvovna*  
Candidate of Sciences (Geography)  
Researcher, Laboratory of Self-Organizing  
of Geosystem  
Institute of Climatological and Ecological  
System SB RAS  
10/3, Akademicheskyy av., Tomsk, 634055,  
Russian Federation  
tel.: (3822) 49-22-23  
e-mail: fts10@yandex.ru

**Дата поступления:** 19.02.2018

**Received:** February, 19, 2018