

Wpłynęło 03.12.2015 r.
Zrecenzowano 31.03.2016 r.
Zaakceptowano 31.03.2016 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В ЛУГОВЫХ АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Анэля А. КУТУЗОВА^{ABCDEF}, Людмила С. ТРОФИМОВА^{BCDEF},
Елена Е. ПРОВОРНАЯ^{BCDEF}

Всероссийский научно-исследовательский институт кормов имени В. П. Вильямса, г. Лобня, Россия

Резюме

В статье излагаются методические основы определения потоков валовой энергии в луговых агроэкосистемах (надземная и подземная масса, плодородие почвы). Показан методический подход в оценке совокупных затрат антропогенной энергии для различных технологий и производства валовой энергии в единых показателях по системе СИ. На приведенных в таблицах примерах, полученных в долговременных стационарных опытах по луговодству, показана ведущая роль природных возобновляемых источников энергии (использование солнечной энергии, биологических особенностей самовозобновляемых фитоценозов, биогенных факторов среды и др.) и в целом роль луговых агроэкосистем в современных биосферных процессах. Наряду с этим, по производству обменной энергии (физиологически доступной животным) и сбору ее в расчете на антропогенные затраты можно прогнозировать экономическую эффективность новых разрабатываемых приемов и технологий в кормопроизводстве. Эта методика может применяться не только в исследованиях по луговодству, но и в других отраслях растениеводства.

Ключевые слова: антропогенные затраты, валовая энергия, луговые агроэкосистемы, методика, обменная энергия

Do cytowania For citation: Кутузова А.А., Трофимова Л.С., Проворная Е.Е. 2016. Методические основы и производственно-экологические результаты оценки потоков энергии в луговых агроэкосистемах [Kutuzova A.A., Trofimova L.S., Provornaya E.E. 2016. Metodyczne podstawy i produkcyjno-ekologiczne aspekty oceny strumieni energii w agroekosystemach łąkowych]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 16. Z. 2 (54) s. 49–75.

ВВЕДЕНИЕ

Луговые агроэкосистемы как часть сельского хозяйства относятся к категории открытых биоэнергетических систем, то есть постоянно нуждаются в дополнительном поступлении антропогенной энергии. Замкнутые самовозобновляющиеся энергосистемы сохранились на удаленных неиспользуемых высокогорьях, долгопоемных лугах и лиманах. Экстенсивно используемые природные кормовые угодья нередко испытывают возрастающую антропогенную нагрузку, когда отчуждение энергии превосходит поступление ее, вследствие чего баланс потоков энергии нарушается, что приводит к их деградации.

До последнего времени интенсификация растениеводства базировалась на увеличении затрат невозполнимой энергии (углеводороды, запасы калийных солей, извести, гипса, металлоруды и др.). При этом на каждый дополнительный центнер продукции требовались все большие затраты «искусственной» энергии [ODUM 1975; ZHUCHENKO 1980]. Состояние сельского хозяйства в России и в мире характеризуется устойчивой тенденцией к экспоненциальному росту затрат невозполнимой энергии. Для преодоления негативных последствий химико-техногенной интенсификации сельское хозяйство нуждается в разработке новых решений по рациональному сочетанию использования техногенных, природных и биологических ресурсов [ZHUCHENKO 1994].

Луговое кормопроизводство, базирующееся на использовании естественных и сеяных травостоев из многолетних трав, отличается от однолетних культур более продолжительным периодом вегетации, способностью к накоплению подземной массы и органического вещества в почве [KUTUZOVA *et al.* 2000; KUTUZOVA 2007]. Поэтому луговые агроэкосистемы обладают более высокой способностью к аккумуляции природных возобновляемых факторов: долголетие фитоценозов, повышение плодородия почв благодаря накоплению органического вещества в основном за счет фотосинтеза, использование физиологической энергии выпасаемых животных, в том числе реутилизация элементов питания из экскрементов животных. Это свойство луговых агроэкосистем проявляется не только по сравнению с однолетними культурами, но и с многолетними травами в севооборотах (вследствие более ограниченного периода их использования).

С учетом удобства унификации терминологии в понятие «луговая агроэкосистема» включены не только типичные луга с преобладанием мезофитных видов многолетних трав в лесной и лесостепной (северная часть) зонах, но также сенокосы и пастбища с ксерофитной растительностью других зон.

Методика оценки суммарного производства валовой энергии в луговых агроэкосистемах позволяет раскрыть взаимодействие антропогенных источников энергии и природных факторов в каждой технологии не только в луговом животноводстве, но и в полевом кормопроизводстве. Кроме того, этот метод дает

возможность проводить сравнительную оценку распределения потоков валовой энергии в надземной массе, характеризующей продукционный процесс луговых фитоценозов, в подземной массе и изменении плодородия почв. Понятие «поток энергии» был введен Одумом [ODUM 1975] для описания поведения энергии в экосистемах. Применение современной международной системы СИ позволяет дать количественную оценку продукционного процесса в целом, а также по взаимодействию антропогенных ресурсов и использованию природных факторов, в том числе, солнечной энергии. Этот метод позволяет оценить последствие применяемых технологий и агротехнических приемов на изменение плодородия почвы в единых показателях, например, в мегаджоулях (МДж) и гигаджоулях (ГДж).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛУГОВЫХ АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Новизна предлагаемой методики заключается в том, что впервые оценка агросистем в луговодстве будет проводиться на основе баланса поступления, накопления и расхода валовой энергии, позволяющего выявить роль природных факторов, а также взаимодействие антропогенных ресурсов с использованием солнечной энергии.

Практическое значение состоит в том, что на основе современного агроэнергетического метода многосторонняя роль лугового кормопроизводства, охарактеризованная в конкретных энергетических показателях, будет показана не только как источник обменной энергии для животноводства, но и раскрыто значение его в общем круговороте энергии с учетом последствия его на изменение плодородия почв и переноса в другие агроэкосистемы (земледелие, растениеводство).

Метод агроэнергетической оценки приемов и технологий позволяет учесть все затраты энергии живого и овеществленного труда в единых показателях на основе международной системы СИ (в джоулях), выявить наиболее энергоемкие звенья с целью их совершенствования, определить затраты антропогенной энергии, сбор валовой и обменной энергии в произведенном корме.

Согласно международной системе измерения физических величин количество энергии измеряется в джоулях (Дж). 1 Дж соответствует 0,2388 калорий, 1 калория – 4,1868 Дж; 1 килоджоуль (КДж) – 1000 Дж 10^3 ; 1 мегаджоуль (МДж) – 1000 КДж или Дж 10^6 ; 1 гигаджоуль (ГДж) – 1000 МДж или Дж 10^9 , 1 тераджоуль (ТДж) – 1000 ГДж или Дж 10^{12} . При этом для оценки качества кормов используют показатель валовой и обменной энергии в МДж, для определения продуктивности 1 га – в ГДж.

Энергоресурсы, используемые в сельском хозяйстве, относятся к 3 категориям: 1) овеществленные затраты труда на ресурсы, поставляемые про-

мышленностью – машины, оборудование, удобрения, пестициды и др., или сельским хозяйством – семена, органические удобрения; 2) прямые затраты на энергетические ресурсы (нефтепродукты – дизельное топливо, бензин, газ) и электроэнергия; 3) энергозатраты трудовых ресурсов – живой труд трактористов, механизаторов, рабочих, пастухов и прочее [Mikhaylichenko *et al.* 1995; 2000].

Источники энергии принято делить на возобновляемые (солнце, ветер, энергия движущейся воды в реках, органические удобрения и др.) и невозобновляемые (ГСМ – горюче-смазочные материалы, электроэнергия, газ, металл, руды минеральных удобрений).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемая методика оценки энергетических потоков в луговых агроэкосистемах включает решение пяти основных задач.

1. Оценка потенциала продуктивности естественных и сеяных фитоценозов сенокосов и пастбищ по производству валовой и обменной энергии при применении различных систем, технологий и приемов.

2. Определение содержания валовой энергии в подземной массе фитоценозов при применении различных систем, технологий и приемов.

3. Влияние луговых агроэкосистем на изменение энергетической емкости плодородия почв.

4. Влияние антропогенных факторов на суммарное накопление валовой энергии в луговых агроэкосистемах и распределение потоков по составляющим элементам.

5. Определение использования природных, биологических факторов и фотосинтетически активной радиации в управляемых антропогенных агроэкосистемах.

Для более быстрого овладения методикой и последовательного проведения расчетов в пособии изложены конкретные примеры (таблицы и пояснения к ним).

Совокупные затраты в изучаемой или рекомендуемой технологии определяют по технологическим картам, учитывающим работу сельскохозяйственных машин, расход материальных ресурсов и трудовых затрат. металлоемкость машин (кг на 1 га) определяют с учетом массы каждой машины, энергетического эквивалента для данного класса, нормативной выработки в единицу времени. Например, при вспашке 1 га плугом ПЛН-4-35 в агрегате с трактором ДТ-75М норма выработки за 1 час составляет 0,74 га, затраты времени на 1 га – 1,35 час, затраты ГСМ – 15,4 кг·га⁻¹ или 811 МДж·га⁻¹, затраты труда – 82 МДж·га⁻¹, затраты работы трактора – 348 МДж·га⁻¹ и плуга – 128 МДж·га⁻¹, всего – 1369 МДж·га⁻¹.

Нормативы для расчета затрат на материальные ресурсы показаны в таблице 1. Энергетические эквиваленты материальных затрат включают всю сумму затрат энергоресурсов на каждом этапе – добычи, производства, транспортировки и хранения.

Энергетические эквиваленты живого труда разработаны ФАО – Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН. В таблице 2 затраты труда (графы 3 и 4) устанавливаются по технологическим картам. Затраты труда на технологическое обслуживание и ремонт сельскохозяйственной техники составляют 25% от общих затрат труда трактористов, шоферов, операторов; затраты на управление технологическими процессами составляют 12% от общей суммы прямых затрат труда.

В итоге все затраты на изучаемые приемы, технологии и системы суммируются, эффективность их в дальнейшем оценивается по показателям окупаемости их сбором валовой и обменной энергии.

Таблица 1. Нормативы для расчета затрат совокупной энергии на материальные ресурсы

Table 1. Norms for calculating the total energy expenditure on material resources

Ресурсы Resources	Энергетический эквивалент, МДж The energy equivalent, MJ	Расход ресурсов на 1 га Expense of resources per 1 ha	Затраты совокупной энергии, МДж·га ⁻¹ Total costs of energy MJ·ha ⁻¹	
			залужение creating meadows	огораживание fencing off
Удобрения, 1 кг действующего вещества: Fertilizers, 1 kg of active substance:				
– азотные nitrogenous	86,8	60	5 208	–
– фосфорные phosphorous	12,6	60	756	–
– калийные potassium	8,3	120	996	–
Топливо жидкое, кг Fuel liquid, kg				
– залужение creating meadows	52,7	133,8	7 051,3	–
– огораживание fencing off	52,7	26,7	–	1 407,1
Электроэнергия, 1 кВт·час Electric energy, 1 kW·h	12	1,29	15,5	–
Железобетонные столбики, м ³ Reinforced concrete pillars, m ³	4 400	0,36	–	1 584,0
Проволока, 1 кг Wire, 1 kg	85,8	46	–	3 946,8
Электроизгородь (комплект), 1 кг Electrofences (complete set), 1 kg	86,4	70	–	6 048,0

Источник: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995].

Source: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995].

Таблица 2. Нормативы для расчета затрат совокупной энергии на трудовые ресурсы**Table 2.** Norms for calculating the total energy consumption on labor resources

Категория работников Category workers	Энергетический эквивалент, МДж/чел.-час работы The energy equivalent, MJ/man-hour of work	Затраты труда, чел.-час·га Labour costs are, man-hour·ha ⁻¹		Затраты совокупной энергии, МДж·га ⁻¹ Expenses total energy, MJ·ha ⁻¹	
		залужение creating meadows	огораживание fencing off	залужение meadow formation	огораживание fencing off
Трактористы-машинисты Tractor drivers-machinists	43,4	10,5	3,82	455,7	165,79
Операторы электрических машин Operators of electrical machines	43,7	0,02	–	0,87	–
Полевые рабочие Field workers	29,7	0,47	1,545	13,96	45,89
Ремонтные рабочие Repair workers	41,8	2,63	0,96	109,93	40,13
Инженерно-технические работники Engineering and technical workers	67,0	1,3	0,64	87,1	42,88
Всего затрат Total costs				667,56	294,69

Источник: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995]. Source: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995].

Для определения потенциала продуктивности сенокосов и пастбищ по производству обменной энергии при применении различных технологий в методике предусматривается решение двух основных задач: определение потенциала сбора обменной энергии в произведенном на сенокосах и пастбищах корме с целью прогнозирования возможного выхода животноводческой продукции; определение совокупных затрат антропогенной энергии в технологиях производства кормов и окупаемости ее сбором валовой и обменной энергии. Для этого вначале определяют концентрацию валовой энергии ($BЭ$) с учетом содержания органических веществ в корме и соответствующих им энергетических коэффициентов (таб. 3) по формуле:

$$BЭ = cП \cdot K_1 + cЖ \cdot K_2 + cКл \cdot K_3 + cБЭВ \cdot K_4, \quad (1)$$

где:

$cП$ = сырой протеин,

$cЖ$ = сырой жир,

- $cKл$ = сырая клетчатка,
 $cБЭВ$ = сырые безазотистые экстрактивные вещества, представленные в долях килограмма в расчете на 1 кг сухого вещества корма;
 K_1-K_4 = энергетические коэффициенты.

Таблица 3. Энергетические коэффициенты питательных веществ корма

Table 3. Energy coefficients of nutrients feed substances

Сырые питательные вещества Raw nutrient substances	Обозначения коэффициентов Designations coefficients	Валовая энергия в 1 кг СВ, МДж Gross energy in 1 kg DM, MJ
Протеин Protein	K_1	24
Жир Fat	K_2	40
Клетчатка Cellulose	K_3	20
БЭВ – безазотистые экстрактивные вещества Nitrogen-free extracts	K_4	17,5

Источник: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995]. Source: МІКНАУЛІСЕНКО *et al.* [1995].

В таблице 4 приведен пример по сбору сухого вещества (СВ), валовой (ВЭ) и обменной (ОЭ) энергии на долголетнем сенокосе (48–60 лет жизни трав) за последние 13 лет пользования. Сбор сухого вещества рассчитан с учетом урожайности фитоценозов и технологических потерь при рулонной заготовке сена (25% от урожайности).

На основании показателей качества корма (содержание сП, сЖ, сКл, сБЭВ) и энергетических коэффициентов (см. таб. 3) рассчитан сбор валовой энергии с 1 га. При подкормке травостоя навозом ($20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ 1 раз в 4 года) и при внесении $P_{45}K_{60}$ сбор сухого вещества и валовой энергии увеличился в 1,6 и 1,7 раза по сравнению с техногенной системой (контроль – старосеяный травостой без удобрений). По мере интенсификации системы ведения сенокоса в результате повышения фактора химизации сбор валовой энергии возрос в 2,1–2,7 раза.

С целью прогнозирования объемов производства животноводческой продукции определяют концентрацию в корме обменной энергии, которая отражает ее физиологически доступную часть. Для унификации агрохимических показателей качества корма по вариантам в различных исследованиях, полученных в полевых агротехнических опытах, для оценки концентрации обменной энергии (ОЭ) применяют формулу Ж. Аксельсона в модификации ГРИГОРЬЕВА и др. [GRIGOR'EV *et al.* 1990]:

$$ОЭ = 0,73 ВЭ \text{ в } 1 \text{ кг СВ } (1 - cKл \cdot 1,05) \quad (2)$$

Таблица 4. Агроэнергетическая эффективность систем ведения долголетних сенокосов (залужение 1946 г.) по сбору обменной энергии, в среднем за 1993–2005 гг.

Table 4. Agrifuels efficiency perennial hay fields systems (meadow formation 1946) for the collection of the metabolic energy, the average for 1993–2005

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including the fertilizer	Сбор с 1 га Gathering from 1 ha			Затраты антропогенной энергии, ГДж·га ⁻¹ Expenses anthropogenic energy, GJ·ha ⁻¹	АК ¹⁾ по сбору ОЭ, раз АС ¹⁾ for the collection of metabolic energy, times	Удельные затраты, МДж/ГДж ОЭ Unit costs, MJ/GJ metabolic energy
		СВ, т DM, t	ВЭ, ГДж gross energy, GJ	ОЭ, ГДж metabolic energy, GJ			
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizers	3,58	1,96	19,1	2,8	6,8	147
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ 1 раз в 4 года dung, 20 t·ha ⁻¹ once in 4 years	6,11	3,27	32,9	10,0	3,3	304
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	P ₄₅ K ₉₀	5,77	3,14	30,5	6,0	5,1	197
	N ₆₀ P ₄₅ K ₉₀	7,34	3,97	38,6	11,5	3,4	298
	N ₉₀ P ₄₅ K ₉₀	8,56	4,58	44,5	14,2	3,1	319
	N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	9,61	5,12	49,8	16,9	3,0	339

¹⁾ АК = агроэнергетический коэффициент. ¹⁾ АС = agrifuels coefficient.

СВ = сухое вещество, ВЭ = валовая энергия, ОЭ = обменная энергия.

Источник: собственные исследования. Source: own study.

где:

$0,73$ = коэффициент обменности;

$c_{Кл}$ = сырая клетчатка;

$1 - c_{Кл} \cdot 1,05$ = коэффициент, отражающий понижающее действие клетчатки на энергетическую ценность корма.

Всестороннюю агроэнергетическую оценку изучаемых технологий следует проводить с учетом четырех основных показателей: сбор обменной энергии с 1 га, совокупные затраты антропогенной энергии, окупаемость их сбором обменной энергии – агроэнергетический коэффициент (AK) и удельные затраты на произведенный 1 ГДж. Пример приведен для долголетнего сенокоса (см. таб. 4). Такой методический анализ позволяет обосновать многовариантные предложения с учетом потребности увеличения производства корма и возможности применения для этого различных затрат. Получение показателя AK , близкого к единице, указывает только на возмещение антропогенных затрат, а превышение единицы – на агроэнергетическую их эффективность. При этом показатель удельных затрат антропогенной энергии на производство 1 ГДж обменной энергии корма является обратной величиной к показателю AK . Проведение агроэнергетической оценки технологии только по показателю AK (или удельным затратам на 1 ГДж $ОЭ$) возможно при сравнении двух технологий, характеризующихся близкими результатами по сбору обменной энергии с 1 га (при разных затратах) или при условии близких затрат антропогенной энергии (при разной продуктивности 1 га). Так, в приведенном примере при довольно близких показателях продуктивности на фоне $20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ навоза и при внесении $P_{45}K_{90}$ ($32,9$ и $30,5 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1} \text{ } ОЭ$) в результате снижения совокупных затрат антропогенной энергии в техногенно-минеральной системе получен более высокий показатель окупаемости их сбором обменной энергии ($5,1$ раза) по сравнению с техногенно-органической системой ($3,3$ раза). Если поставлена научная и практическая задача получить более высокую продуктивность сенокоса, то в указанном примере этому соответствует повышение фона удобрений до $N_{120}P_{45}K_{90}$, несмотря на снижение показателя AK (до $3,0$ раза) по сравнению с предыдущим показателем на фоне $P_{45}K_{90}$ (AK $5,1$ раза).

Корневая система луговых растений обеспечивает не только поступление питательных веществ из почвы в надземную часть агрофитоценозов, но и оказывает существенное последствие на изменение плодородия почвы в результате накопления, частичного отмирания и ее минерализации. Если в первые годы пользования сеянными луговыми травостоями отмечается прогрессивное накопление корневой массы, то впоследствии этот процесс стабилизируется. Так, в условиях суходольного луга после $12-13$ лет пользования на фоне разных удобрений в почве сформировалось $18,4-26,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ подземных органов (корней, корневищ и других в слое $0-20 \text{ см}$), среднегодовые

темпы накопления за этот период составили 1,5–2,0 т·га⁻¹ сухого вещества. В общем запасе подземной массы содержится до 400 кг азота и K₂O, около 80–100 кг P₂O₅ [KUTUZOVA, FEDOROVA 1987]. В последующие годы процессы новообразования, отмирания и разложения корней приходят почти в равновесное состояние. Минерализация отмершей части подземных органов происходит активно и непрерывно во всех луговых почвах нормального увлажнения, что обусловлено достаточным количеством кислорода в почвенном воздухе и отсутствием высокой концентрации CO₂, оказывающей консервирующее влияние на превращение органического вещества [GUDKOV 1984]. Этот процесс способствует накоплению гумуса в почве непосредственно в процессе использования луга. Равновесное состояние накопления и разложения корневой массы является важным показателем устойчивости луговых фитоценозов. В связи с этим количественную оценку корневой массы необходимо проводить при завершении исследований в краткосрочных полевых опытах (через 4–6 лет), в долготлетних (стационарных) опытах периодически – один раз в 5–10 лет в зависимости от зоны и продолжительности использования сенокосных и пастбищных агрофитоценозов. В связи с тем, что на лугах посев трав проводится, как правило, разбросно-рядовым и разбросным способом, а не рядовым, как принято на пашне, для отбора почвенных проб с целью определения запаса корней удобно пользоваться цилиндрическим буром, что апробировано в исследованиях Института кормов [KONYUSHKOV *et al.* 1971].

В связи с тем, что основная корневая масса луговых растений в лесной зоне находится в верхнем слое почвы, можно ограничиться определением массы корней в слое 0–10 и 10–20 см. В степной зоне, где глубина распространения основной массы корней больше, для определения отбора проб по слоям необходимо провести ориентировочные раскопки распространения корневых систем.

Учитывая трудоемкость определения корней, образцы почвы для отмывки следует отобрать на основных – перспективных вариантах и в контроле (то есть не по всем вариантам схемы полевого опыта). Для последующей статистической обработки полученных результатов отбор проб проводят не менее чем на трех повторностях полевого опыта, по 5–10 уколов на делянке. Такого количества обычно бывает достаточно на мелкотравном травостое. Перед отбором проб очистить поверхность почвы, срезав растения (или стерню) на уровне поверхности почвы, собрать опад (старик) и учитывать ее отдельно (определить биомассу и содержание в ней N, P₂O₅ и K₂O в кг·га⁻¹).

Отмывать желательно свежие корни на ситах с диаметром отверстий 0,15 мм. После этого отжатые корни перекалывают для просушивания до постоянного веса. Из отмытого образца отбирают пинцетом попавшую стерню (ее присоединяют к основному образцу) и сор (кусочки древесины, листья древесных пород и т. п.).

В луговой дернине (корневой массе) неизбежно присутствие механических примесей (минеральные частицы, плотно скрепленные с отдельными корнями), которые не удастся отмыть приведенным выше методом. Количество этих минеральных примесей в корнях определяют методом сжигания, получая вначале суммарное количество золы и механических примесей в среднем образце, затем в этом же образце определяют количество золы либо методом мокрого озоления, либо методом сжигания более крупных, наиболее чисто отмытых корней. Допустимо также для определения содержания ВЭ ориентироваться на содержание золы в надземной массе. Вычитая из полученного содержания золы (с минеральными частицами) в среднем образце истинное ее содержание, получаем процентное содержание механических примесей в среднем образце корней. Это количество необходимо исключить при расчете массы корней, а также учитывать при расчете химического состава корневой массы, умножая полученные при химическом анализе показатели на коэффициент $\frac{100}{100 - a}$, где a – содержание механических примесей в корнях, %.

Валовая энергия (ВЭ) в корнях рассчитывается по общепринятой методике, для чего определяют содержание протеина (по общему азоту), клетчатки, жира, золы, рассчитывают $БЭВ$; на примере злакового и бобово-злакового сенокосов это показано в таблице 5.

При оценке минерального состава корней следует ограничиться определением содержания золы, азота и фосфора. Содержание калия в корнях не подлежит оценке, так как при отмывке в связи с большой подвижностью его происходят значительные потери. Истинное содержание калия в корнях можно определить в вегетационных опытах с песчаными или супесчаными почвами, позволяющими провести быструю отмывку образцов, что обеспечит минимальные потери калия.

Определенная в корнях валовая энергия характеризует роль антропогенных факторов в сочетании с природными на накопление органической массы, являющейся источником гумуса (углерода) в почве. Эта информация показывает суммарное накопление валовой энергии в агроэкосистеме в целом, что необходимо для оценки их роли в современных биосферных процессах.

Оценка изменения валовой энергии плодородия почвы под влиянием изучаемых приемов проводится на основе результатов агрохимических анализов почвы в исходном состоянии и на момент оценки. Агрохимические анализы почв проводятся по общепринятым методикам в зависимости от типа почв. Так, для дерново-подзолистых почв содержание гумуса определяют по Тюрину, общего азота – по Кьельдалю, подвижных форм фосфора и калия – по Кирсанову, $pH_{\text{сол}}$ – потенциметрически.

Для расчета валовой энергии используются средние результаты анализов почвенных проб, отобранных два года подряд, с целью получения более объ-

Таблица 5. Влияние систем ведения и состава травостоев сенокосов на накопление валовой энергии (ВЭ) в подземной массе (слой почвы 0–20 см)

Table 5. Influence conducting systems and composition of herbage hayfields on the accumulation gross energy (GE) in underground mass (0–20 cm soil layer)

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including fertilizer	Состав травостоя Herbage composition	Масса корней, т·га ⁻¹ СВ Weight roots, t·ha ⁻¹ DM	Содержание ВЭ МДж·кг ⁻¹ СВ Content of GE MJ·kg ⁻¹ DM		Соотношение ВЭ подземной массы ВЭ надземной массы Ratio <u>GE underground mass</u> GE aboveground mass	Закрепление ВЭ в корнях ГДж·га ⁻¹ Fixing GE in the roots GJ·ha ⁻¹
				подземная масса underground mass	надземная масса aboveground mass		
Злаковый сенокос (после 60 лет жизни трав) Grasses hay (after 60 years of herbs life)							
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	разнотравно-злаковый forb-grasses	21,23	18,0	18,4	0,98	182,2
Техногенно- органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ 1 раз в 4 года dung, 20 t·ha ⁻¹ once in 4 years	разнотравно-бобово- злаковый forb-legume-grasses	20,96	16,7	19,0	0,88	350,0
Техногенно- минеральная Technogenic-mineral	N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	злаковый grasses	23,44	16,5	18,8	0,88	386,8
Бобово-злаковый сенокос (после 5 лет жизни трав) Legume-grasses hay (after 5 years of herbs life)							
Техногенно- минеральная Technogenic-mineral	P ₆₀ K ₁₀₀	с клевером луговым Тетраплоидный ВИК with red clover Tetraploid VIK	12,55	17,6	18,4	0,96	220,9
		с люцерной изменчивой Лада with variable alfalfa Lada	13,68	18,0	18,5	0,97	246,2
		с лядвенцем рогатым Луч with a lotus horned Luch	12,95	17,7	18,4	0,96	229,2

Источник: собственные исследования. Source: own study.

активных (устойчивых) данных. Результаты агрохимических анализов по слоям почвы 0–10 и 10–20 см заносятся в рабочую таблицу 6 (пример приведен для суходольного луга). С учетом плотности (объемной массы) почвы в каждом слое определяют запас содержания гумуса, азота, фосфора и калия в килограммах на гектар. В рабочей таблице по этим данным определяют запас и средневзвешенное содержание гумуса, азота, фосфора и калия в слое почвы 0–20 см, среднее содержание $pH_{\text{сол}}$ и полученные данные заносятся в таблицу. Содержание минеральных веществ в почве переводится в количество удобрений, которое необходимо внести, чтобы получить соответствующее содержание этих элементов в почве. Учитывая превращение удобрений в почве (частичное закрепление в необменной форме), при расчете валовой энергии использовали размеры запаса доступных питательных веществ в почве, умноженные на установленные в ранее проведенных специальных исследованиях коэффициенты: для азотных удобрений – 1,25, для фосфорных – 2,7 на краткосрочных опытах и 2,9 – на долголетних, для калийных – 1,7. Это соответствует тому, что при внесении азотных удобрений 80% остается в доступной форме, фосфорных – 37 и 35%, калийных – 60% от внесенной дозы (пример расчета в пояснении к таблице 7).

Энергозатраты на удобрения принимали в соответствии с нормативами по "Методическому пособию по агроэнергетической и экономической оценке технологий и систем кормопроизводства" [1995; 2000].

На основе ранее установленных затрат для сдвига активной кислотности почвы на 0,1 $pH_{\text{сол}}$ [ШНП 1990] в расчетах принято: 4,3 ГДж·га⁻¹ для сильно-кислых почв ($pH_{\text{сол}}$ 4,1–4,5) и 3,4 ГДж·га⁻¹ для других уровней кислотности ($pH_{\text{сол}}$ более 4,6). Затраты на накопление гумуса, благодаря дерново-образовательному процессу, по итогам долголетних исследований, на дерново-подзолистой почве составляют 7 ГДж·га⁻¹ на 1 т гумуса; на других типах почв это требует специального определения.

Таким образом, с учетом коэффициентов закрепления удобрений и энергозатрат на удобрения рассчитывается содержание ВЭ по показателям плодородия почвы. Результаты заносятся в таблицу 7.

Расчет валовой энергии (ВЭ) проводится по следующей формуле:

$$ВЭ = P \cdot Kф \cdot Ээ \quad (3)$$

где:

P = содержание питательного вещества в почве, кг·га⁻¹;

$Kф$ = коэффициент, связанный с закреплением удобрений в почве в недоступной форме;

$Ээ$ = энергетический эквивалент применяемых удобрений, МДж·кг⁻¹ д.в.

Совокупный запас энергии в почве в основном определяется гумусом и общим азотом, тогда как на долю подвижных форм P_2O_5 и K_2O приходится

Таблица 6. Агрохимическая характеристика почвы долголетнего сенокоса при разных системах ведения (слой почвы 0–20 см)**Table 6.** Agrochemical soil characteristic of perennial hay in different conducting systems (0–20 cm soil layer)

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including fertilizer	Агрохимические показатели Agrochemical indices					Содержание, кг·га ⁻¹ Content, kg·ha ⁻¹			
		pH _{сол.} pH saline	подвижный фосфор, мг·кг ⁻¹ movable phosphorus, mg·kg ⁻¹	обменный калий, мг·кг ⁻¹ exchangeable potassium, mg·kg ⁻¹	общий азот, % total nitrogen, %	гумус, % humus, %	подвижный фосфор movable phosphorus	обменный калий exchangeable potassium	общий азот total nitrogen	гумус humus
Исходное состояние Initial condition	–	4,3	60	70	0,12	2,03	150	175	3000	50800
Техногенная Technogenic	–	4,5	46	66	0,20	3,28	105	148	4550	73850
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	4,4	92	51	0,16	3,20	207	115	3625	71950
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ 1 раз в 4 года dung, 20 t·ha ⁻¹ once in 4 years	4,6	50	63	0,22	3,63	113	142	5025	81700

Источник: собственные исследования. Source: own study.

Таблица 7. Агроэнергетическая оценка плодородия почвы при разных системах ведения долголетнего сенокоса (слой почвы 0–20 см)

Table 7. Agrifuels assessment of soil fertility under different conducting systems perennial hay (0–20 cm soil layer)

Технологическая система и удобрение Technological system and fertilizer	Содержание энергии Energy content									Изменение энергии за счет $\Delta pH_{\text{сол.}}$, $\text{ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ Change of energy due $\Delta pH_{\text{saline}}$ $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$	Итого In total		
	$\text{ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$					% от суммы % from the sum					$\text{ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$	% к исходному % to the initial	% к контролю % to control
	фосфор phosphorus	калий potassium	общий азот total nitrogen	гумус humus	сумма sum	фосфор phosphorus	калий potassium	общий азот total nitrogen	гумус humus				
Исходное состояние Initial condition	0,70	2,62	325,5	355,6	684,4	0,10	0,38	47,6	52,0	–	684	100	–
Техногенная: без удобрений Technogenic: without fertilizers	0,49	2,21	493,7	517,0	1013,3	0,05	0,22	48,7	51,0	+ 8,6	1022	149	100
Техногенно-минеральная: $N_{120}P_{45}K_{90}$ Technogenic mineral: $N_{120}P_{45}K_{90}$	0,96	1,72	393,3	503,7	899,6	0,11	0,19	43,7	56,0	+ 4,3	904	132	88
Техногенно-органическая: навоз, $20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ 1 раз в 4 года Technogenic-organic: dung, $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ once in 4 years	0,52	2,12	545,2	1206,9	1754,8	0,03	0,12	31,1	68,8	+ 12,9	1768	258	173

Источник: собственные исследования. Source: own study.

менее 1% от суммы ВЭ основных питательных веществ почвы. В связи с этим допустимо оценивать энергию плодородия почвы по двум показателям: содержанию общего азота и гумуса.

Для получения итогового показателя потенциала энергии плодородия почвы необходимо учесть изменение кислотности почвы и прибавить (в случае повышения $pH_{\text{сол.}}$) или вычесть (при уменьшении $pH_{\text{сол.}}$) из совокупной энергии затраты, которые соответствуют установленным изменениям, то есть 3,4 ГДж на каждые 0,1 $pH_{\text{сол.}}$ изменения кислотности почвы (или 4,3 ГДж для pH меньше 4,5).

Оценка изменения запасов энергии в результате динамики плодородия почвы проводится по сравнению с исходным содержанием (на начало проведения опыта) и (или) с контролем или иным, требующим сравнения вариантом, системой или технологией.

Пример расчета валовой энергии (ВЭ) для техногенной системы представлен в таблице 7.

1. В слое почвы 0–20 см содержится $105 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$. Коэффициент закрепления фосфорных удобрений составляет 65%, а в подвижной форме в почве накапливается 35% от внесенной дозы фосфорных удобрений, коэффициент для расчета расхода удобрений равен $1 : 0,35 = 2,9$. Энергетический эквивалент фосфоритной муки – 1,6 МДж на 1 кг д. в.

Содержание валовой энергии составит:

$$ВЭ = 105 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot 2,9 \cdot 1,6 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} = 487 \text{ МДж} \cdot \text{га}^{-1} = 0,49 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}.$$

2. В почве содержится $148 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$. Коэффициент закрепления 0,40, коэффициент для расчетов расхода удобрений равен $1 : 0,60 = 1,7$. Энергетический эквивалент хлористого калия – 8,8 МДж на 1 кг д. в.

$$ВЭ = 148 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot 1,7 \cdot 8,8 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} = 2214 \text{ МДж} \cdot \text{га}^{-1} = 2,21 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}.$$

3. В почве содержится $4\,550 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ общего азота. Коэффициент закрепления 0,20, коэффициент для расчетов расхода удобрений равен $1 : 0,80 = 1,25$. Энергетический эквивалент аммиачной селитры – 86,8 МДж на 1 кг д. в.

$$ВЭ = 4550 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot 1,25 \cdot 86,8 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} = 493675 \text{ МДж} \cdot \text{га}^{-1} = 493,7 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}.$$

4. В почве содержится $73\,850 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ гумуса. Энергетический эквивалент 7 ГДж·т⁻¹ (установлен в долготлетнем опыте).

$$ВЭ = 73,85 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot 7 \text{ ГДж} \cdot \text{т}^{-1} = 517,0 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}.$$

5. $pH_{\text{сол.}}$ в почве за период 1946–1999 гг. увеличился с 4,3 до 4,5, то есть $\Delta pH = +0,2$. Для сдвига $pH_{\text{сол.}}$ на $\Delta 0,1$, требуется энергозатрат $4,3 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$. Следовательно, изменение энергии при $\Delta pH = +0,2$ составит $8,6 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$.

Как следует из результатов таблицы 7, энергоемкость почвенного плодородия за 53-летний период повысилась на 32–158% по сравнению с исходным

состоянием. Среднегодовые темпы прироста запаса валовой энергии составили $6,4 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенной, $4,2 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенно-минеральной и $20,5 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенно-органической системах. Следует отметить, что ежегодное применение удобрений в дозах $\text{N}_{120}\text{P}_{45}\text{K}_{90}$, которые по составу и продуктивности фитоценоза были наиболее эффективными в этих условиях суходольного луга, способствовали ускорению процесса минерализации органического вещества дернины и реутилизации элементов питания урожаем трав. Наиболее высокие темпы прироста энергетических показателей плодородия почвы, отмеченные при периодическом внесении органических удобрений, были обусловлены высокими темпами среднегодового прироста запасов гумуса (по $583,0 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$) и азота (по $38 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$) в почве благодаря формированию бобово-разнотравно-злакового фитоценоза.

Примеры изменения запасов энергии в почве краткосрочных пастбищ (за 6 лет жизни фитоценоза и применения изучаемых систем) приведены в таблице 8. Повышение энергоёмкости почвенного плодородия в зависимости от типа фитоценозов составило 2–14% на злаковом и 11–18% на бобово-злаковом пастбищах к исходному уровню.

На злаковом пастбище получены следующие среднегодовые приросты валовой энергии за счет изменения плодородия почвы: $2,4 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенной, $6,9 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенно-органической и $18,6 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в техногенно-минеральной системах. Более низкие темпы накопления энергии при применении техногенной системы на злаковом пастбище по сравнению с долготлетним сенокосом обусловлены активным разложением органического вещества запаханной дернины и, напротив, более высокие темпы пополнения запасов энергии в почве при применении техногенно-минеральной и техногенно-органической системы на пастбище связаны с первым этапом прогрессирующего накопления органического вещества дернины (таб. 5), когда фаза равновесного этапа процесса накопления и разложения отмершей дернины еще не наступила.

На бобово-злаковом пастбище темпы накопления валовой энергии в техногенной ($24,1 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$) и в техногенно-органической ($18,9 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ в год) системах были заметно выше, чем на злаковом пастбище, что связано с дополнительным влиянием биологического фактора. В техногенно-минеральной системе роль биологического фактора по темпам накопления валовой энергии за счет прироста показателей плодородия почвы на бобово-злаковом пастбище в условиях Центрального района лесной зоны оказалась близкой к влиянию минеральных азотных удобрений в дозе N_{100} ежегодно. Можно отметить, что внесение органических и фосфорно-калийных удобрений в связи с увеличением содержания бобовых в травостое способствовало ускорению процессов минерализации их отмерших корней, поэтому отмечена тенденция снижения темпов прироста валовой энергии по сравнению с неудобренными травостоями в техногенной системе.

Таблица 8. Агроэнергетическая оценка плодородия почвы при разных системах ведения пастбищ (слой почвы 0–20 см)**Table 8.** Agrifuels assessment of soil fertility under different systems pastures conducting (0–20 cm soil layer)

Технологическая система Technological system	В том числе удобрение Including fertilizer	Содержание энергии, ГДж·га ⁻¹ Energy content, GJ·ha ⁻¹					Изменение энергии в связи с ΔрН _{сол.} , ГДж·га ⁻¹ Change of energy in connection with the ΔрН saline GJ·ha ⁻¹	Итого In total	
		фосфор phosphorus	калий potassium	азот nitrogen	гумус humus	сумма sum		ГДж·га ⁻¹ GJ·ha ⁻¹	% к исходному % to the initial
Исходный уровень Initial level	–	1,2	3,5	433,5	378,4	816,6	–	816,6	100
Злаковые пастбища Grasses pastures									
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	1,1	2,1	433,5	401,4	838,1	–6,8	831,3	102
Техногенно- -органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	1,3	3,5	433,5	419,5	857,8	0	857,8	105
Техногенно- -минеральная Technogenic-mineral	N ₉₀ P ₄₅ K ₉₀	1,2	2,9	510,0	431,0	945,1	–17,0	928,1	114
Бобово-злаковые пастбища Legume-grasses pastures									
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	1,0	2,1	535,4	429,8	967,8	–6,8	961,0	118
Техногенно- -органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	1,4	4,2	510,0	414,5	930,1	0	930,1	114
Техногенно- -минеральная Technogenic-mineral	P ₄₀ K ₁₀₀	1,1	3,9	535,4	412,9	953,3	–13,6	939,7	115

Источник: собственные исследования. Source: own study.

Размеры накопления валовой энергии в целом луговыми агроэкосистемами определяют как сумму содержания валовой энергии в надземной и подземной массе ее фитоценозов и изменение энергоемкости плодородия почв по сравнению с исходным состоянием. По этому показателю можно проводить сравнение различных луговых агроэкосистем, а также оценить влияние различных антропогенных факторов на накопление валовой энергии в агроэкосистеме.

Отношение суммарного показателя накопления валовой энергии к антропогенным совокупным затратам характеризует эффективность технологий по влиянию на общий энергетический процесс луговых агроэкосистем. Для наглядности оценки полученных результатов в таблице 9 приведены примеры, полученные на сеяных пастбищах центрального района лесной зоны. Накопление валовой энергии в техногенной системе злакового неудобряемого пастбища в среднем за 5 лет составило $93,4 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$, в техногенно-органической системе этот показатель повысился на 36%, в техногенно-минеральной системе – на 78% (по сравнению с техногенной). Основная доля накопленной энергии распределялась на надземную (51–59%) и подземную массу фитоценозов (30–46%), изменение энергоемкости плодородия почв за этот период составило 3–13% в зависимости от применяемых технологий. Окупаемость антропогенных затрат накопленной валовой энергией в указанных агроэкосистемах достигала 4–12 раз. При этом наиболее высокий коэффициент окупаемости установлен в техногенной системе, где затраты антропогенной энергии были минимальными, в техногенно-минеральной системе этот показатель составил 9,4 раза, а в техногенно-органической снизился до 4,2 раза. Это в целом отражает общеизвестный экспоненциальный характер окупаемости антропогенных затрат: по мере интенсификации технопроцесса отдача на единицу затраченных ресурсов снижается.

На бобово-злаковом пастбище, применяя этот метод, можно оценить в количественных показателях дополнительный фактор – биологизацию продукционных процессов за счет включения симбиотической азотфиксации в агроэкосистему. Так, в техногенной системе, благодаря используемому биологическому фактору, накопление валовой энергии увеличилось на 47% (с $93,4$ до $137,0 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$), в техногенно-органической системе – на 25% (с $126,7$ до $158,6 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$), в техногенно-минеральной системе на фоне РК эффект по накоплению валовой энергии соответствовал 92% от произведенной валовой энергии злаковым фитоценозом при ежегодном применении азотных удобрений в дозе N_{100} . За пять лет пользования прямая экономия азотных удобрений на бобово-злаковом травостое достигала $39,9 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$ (расчет: $86,8 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ N} \cdot 500 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot 0,92$).

Оценка распределения потоков валовой энергии по составляющим элементам агроэкосистемы указывает на положительное влияние бобово-злаковых фитоценозов на повышение показателей плодородия почвы, что

Таблица 9. Распределение валовой энергии (ВЭ) по элементам агроэкосистем на пастбищах за 5 лет пользования**Table 9.** Distribution of gross energy (GE) by elements of agroecosystems in the pastures for 5 years of use

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including fertilizer	Затраты антропогенной энергии, ГДж·га ⁻¹ Expenses of anthropogenic energy GJ·ha ⁻¹	Накопление валовой энергии в агроэкосистеме ГДж·га ⁻¹ Accumulation of gross energy in agroecosystem GJ·ha ⁻¹					Распределение валовой энергии, % от суммы Distribution of gross energy % from the amount			Окупаемость антропогенных затрат накоплением ВЭ, раз Payback anthropogenic expenses GE accumulation, times
			надземная масса aboveground mass	подземная масса underground mass	изменение плодородия почвы soil fertility change	всего total	% к техногенной системе % to technogenic system	надземная масса aboveground mass	подземная масса underground mass	изменение плодородия почвы soil fertility change	
Злаковые пастбища Grasses pastures											
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	8,0	47,9	42,6	2,9	93,4	100	51,3	45,6	3,1	11,7
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	30,3	74,5	44,0	8,2	126,7	136	58,8	34,7	6,5	4,2
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	N ₁₀₀ P ₄₀ K ₁₀₀	17,8	94,5	49,9	22,3	166,7	178	56,7	29,9	13,4	9,4
Бобово-злаковые пастбища Legume-grasses pastures											
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	8,4	63,7	44,4	28,9	137,0	100	46,5	32,4	21,1	16,3
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	32,6	89,5	46,4	22,7	158,6	116	56,4	29,3	14,3	5,2
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	P ₄₀ K ₁₀₀	10,7	83,5	48,9	20,5	152,9	112	54,6	32,0	13,4	14,3

Источник: собственные исследования. Source: own study.

было обусловлено не только увеличением накопления гумуса, но и запаса общего азота (таб. 8). Это имеет большое значение с учетом того, что плодородие почв сенокосов и пастбищ во всех регионах страны, как правило, значительно уступает пашне.

Аналогичные закономерности получены при сравнении технологий и состава травостоев на сенокосах (таб. 10).

Производство валовой энергии в луговых агроэкосистемах раскрывает их роль в современных биосферных процессах [KUTUZOVA *et al.* 2015]. Накопление валовой энергии агроэкосистемами в целом за счет надземной и подземной массы фитоценозов в сумме с изменением энергоёмкости плодородия почвы в техногенно-органической системе повысилось на 82% и в техногенно-минеральной системе – на 48–122% по сравнению с техногенной системой (таб. 11). Это обусловлено не только за счет увеличения антропогенных затрат энергии, но и благодаря мобилизации в продукционный процесс природных факторов – самовозобновление фитоценозов, реутилизация элементов питания из подземных органов растений и экскрементов животных, а также вследствие влияния техногенных источников – поступление с атмосферными и аэрозольными осадками. Поступление энергии природных факторов в техногенно-органической системе увеличилось на 71% по сравнению с техногенной системой и в техногенно-минеральной системе – на 44–99%. Доля природных факторов в производстве валовой энергии в техногенно-минеральной системе составила 84–92%, то есть в 8–9 раз превосходила затраты антропогенных источников энергии.

Использование природных факторов на бобово-злаковых травостоях (таб. 12) было существенно выше по сравнению со злаковыми фитоценозами – на 50% в техногенной и на 24% в техногенно-органической системах, в техногенно-минеральной системе только на 4% уступало злаковому пастбищу [KUTUZOVA *et al.* 2011]. Следовательно, луговые агроэкосистемы способны за счет использования солнечной энергии, биологической особенности фитоценозов и их средообразующей роли поддерживать положительный баланс энергии в современных биосферных процессах на Земле. Полученные экспериментальные результаты подтверждают научную гипотезу Одума [ODUM 1975], согласно которой луговые биоэкосистемы по производству валовой энергии занимают третье место после мировых океанических систем и тропических лесов. Применение разработанной методики в других почвенно-климатических условиях позволит раскрыть роль зональных и региональных почвенно-климатических особенностей, биологических факторов (видовой и сортовой состав фитоценозов целевого назначения) и фотосинтетически активной радиации с целью управления агроэкосистемами.

Таблица 10. Накопление и распределение валовой энергии (ВЭ) по элементам агроэкосистем на сенокосах в среднем за 1 год**Table 10.** Gross energy (GE) accumulation and distribution of elements in agroecosystems on hayfields for 1 year average

Технологическая система Technological system	В том числе удобрение, травостой Including fertilizer, herbage	Затраты антропогенной энергии, ГДж·га ⁻¹ Expenses anthropogenic energy, GJ·ha ⁻¹	Накопление валовой энергии в агроэкосистеме, ГДж·га ⁻¹ Accumulation of gross energy in agroecosystem, GJ·ha ⁻¹				Распределение валовой энергии, % от суммы			Окупаемость антропогенных затрат накоплением ВЭ, раз Payback anthropogenic expenses GE accumulation, times
			надземная масса overground mass	подземная масса underground mass	изменение плодородия почвы soil fertility change	всего total	надземная масса overground mass	подземная масса underground mass	изменение плодородия почвы soil fertility change	
Злаковый сенокос (после 60 лет жизни трав) Grasses hay (after 60 years of life herbs)										
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	2,8	35,8	5,8	6,4	48,0	75	12	13	17,1
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ 1 раз в 4 года dung, 20 t·ha ⁻¹ once in 4 years	10,0	61,1	5,8	20,5	87,4	70	7	23	8,7
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	16,9	96,1	6,4	4,2	106,7	90	6	4	6,3
Бобово-злаковый сенокос (после 5 лет жизни трав) Legume-grasses hay (after 5 years of life herbs)										
Техногенно-минеральная, P ₆₀ K ₁₀₀ Technogenic-mineral P ₆₀ K ₁₀₀	с клевером луговым Тетраплоидный ВИК with red clover Tetraploid VIK	10,7	91,7	44,2	17,9	153,8	59,7	28,7	11,6	16,8
	с клевером гибридным Первенец with clover hybrid Pervenets	10,6	85,7	37,9	31,8	155,4	55,1	24,4	20,5	14,7
	с люцерной изменчивой Лада With variable alfalfa Lada	11,0	121,0	49,2	44,5	214,7	56,4	22,9	20,7	19,5
	с лядвенцем рогатым Луч with a lotus horned Luch	10,6	65,8	45,8	38,5	150,1	43,8	30,5	25,6	14,2

Источник: собственные исследования. Source: own study.

Таблица 11. Поступление энергии в луговые агроэкосистемы долголетних сенокосов за счет антропогенных и природных факторов (в среднем за 1993–2005 гг.)

Table 11. Energy release in grassland agroecosystem perennial hay fields due to anthropogenic and natural factors (average for 1993–2005)

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including fertilizer	Производство ВЭ, ГДж·га ⁻¹ Production gross energy GJ·ha ⁻¹	Совокупные антропогенные затраты, ГДж·га ⁻¹ Aggregate anthropogenic expenses GJ·ha ⁻¹	Поступление энергии за счет природных факторов Energy input of due to natural factors		
				ГДж·га ⁻¹ GJ·ha ⁻¹	%	% от производства % of production
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	48,0	2,8	45,2	100	94
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ 1 раз в 4 года dung, 20 t·ha ⁻¹ once in 4 years	87,4	10,0	77,4	171	89
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	P ₄₅ K ₉₀	70,9	6,0	64,9	144	92
	N ₆₀ P ₄₅ K ₉₀	84,7	11,5	73,2	162	86
	N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	106,7	16,9	89,8	199	84

Источник: собственные исследования. Source: own study.

Таблица 12. Поступление энергии в луговые агроэнергосистемы краткосрочных пастбищ за счет антропогенных и природных факторов (в среднем за 5 лет)

Table 12. Energy releases in short-term meadow pastures grassland ecosystems at the expense anthropogenic and natural factors (an average of 5 years)

Технологическая система Technological system	В том числе, удобрение Including fertilizer	Производство ВЭ, ГДж·га ⁻¹ Production gross energy GJ·ha ⁻¹	Совокупные антропогенные затраты, ГДж·га ⁻¹ Aggregate anthropogenic expenses GJ·ha ⁻¹	Поступление энергии за счет природных факторов Energy input of due to natural factors		
				ГДж·га ⁻¹ GJ·ha ⁻¹	%	% от производства % of production
1	2	3	4	5	6	7

Злаковое пастбище Grasses pasture

Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	93,4	8,0	85,4	100	0,91
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	126,7	30,3	96,4	113	0,75

Таблица 12

1	2	3	4	5	6	7
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	$N_{100}P_{40}K_{100}$	166,7	17,8	148,9	174	0,89
Бобово-злаковое пастбище Legume-grasses pasture						
Техногенная Technogenic	без удобрений without fertilizer	137,0	8,4	128,3	100	0,94
Техногенно-органическая Technogenic-organic	навоз, 20 т·га ⁻¹ ежегодно dung, 20 t·ha ⁻¹ annually	158,6	32,6	120,0	94	0,76
Техногенно-минеральная Technogenic-mineral	$P_{40}K_{100}$	152,9	10,7	142,2	119	0,94

Источник: собственные исследования. Source: own study.

ВЫВОДЫ

1. Определение антропогенных затрат с учетом живого и овеществленного труда по системе СИ в ГДж·га⁻¹ в технологиях производства сельскохозяйственной продукции (в том числе корма) позволяет выявить наиболее энергоемкие приемы и звенья с целью дальнейшего их совершенствования для энерго- и ресурсосбережения.

2. Для решения первоочередной задачи в области кормопроизводства – повышения продуктивности надземной массы (с учетом неизбежных технологических потерь по сбору обменной энергии в ГДж·га⁻¹) разработанный метод позволяет прогнозировать выход животноводческой продукции, а по совокупным затратам антропогенной энергии (в ГДж·га⁻¹) и сбором обменной энергии – научно обосновать выбор адаптивной технологии с учетом природных и материально-технических условий хозяйств.

3. Определение содержания валовой энергии в подземной массе луговых фитоценозов и изменений энергоемкости плодородия почв под влиянием фитоценозов и разработанных технологий характеризует средообразующую роль, выраженную в единых показателях (ГДж·га⁻¹).

4. На основе балансового метода по разнице производства валовой энергии в любой агроэкосистеме (технологии) и совокупных затрат антропогенной энергии можно определить роль природных факторов в количественных показателях (ГДж·га⁻¹).

5. Предлагаемый метод дает возможность целенаправленно решать задачи конструирования агроэкосистем в луговодстве с учетом распределения валово-

вой энергии в надземной и подземной массе фитоценозов, последствия их на энергоёмкость плодородия почвы, а также определить в количественных показателях ($\text{ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$) взаимосвязь с другими агроэкосистемами в растениеводстве и земледелии.

6. Применение метода позволяет оценить глобальную эколого-энергетическую роль луговых агроэкосистем и технологий в современных биосферных процессах на Земле и экономически обосновать целесообразность лугового кормопроизводства.

ЛИТЕРАТУРА

- GRIGOR'EV N. G., GARIST A. V., SOKOLKOV V. M., VOLKOV N. P., TASHCHILIN V. A., KHUDYAKOVA KH. K., CHUYKOV V. A., PETLAKH M. M., KUSAKINA YE. A., SHUMILIN I. S., MARNOV D. I. 1990. Оценка качества основных видов кормов для жвачных животных (Рекомендации) [Evaluation of the quality of basic types of feed for ruminants (Recommendations)]. Москва. ВО "Агропромиздат" сс. 46.
- GUDKOV V. V. 1984. Повышение продуктивности долголетних сеяных сенокосов в Центральном районе Нечерноземной зоны [The productivity increasing of perennial grassland sown in the Central Region of Non-Chernozem Zone]. Автореферат диссертации канд. с.-х. наук. Москва. ВНИИ кормов им. В. П. Вильямса сс. 16.
- KONYUSHKOV N. S., MININA I. P., RABOTNOV T. A., SMELOV S. P., TATARINOVA N. K., SHAIN S. S. 1971. Изучение корневых систем травянистых растений. В: Методика опытов на сенокосах и пастбищах [The study of the root system of herbaceous plants. In: Methods of experiments on grasslands and pastures]. Москва. ВИК с. 142–153.
- KUTUZOVA A. A. 2007. Прогноз роли луговых экосистем в кормопроизводстве и биосферных процессах [Forecast role of meadow ecosystems in fodder production and biosphere processes]. Кормопроизводство. Но 10 с. 2–4.
- KUTUZOVA A. A., FEDOROVA L. D. 1987. Плодородие почв и интенсивные технологии [Soil fertility and intensive technologies]. Кормопроизводство. Но 3 с. 32–36.
- KUTUZOVA A. A., TROFIMOVA L. S., OLIGER M. A., BORZOVA T. F. 2000. Луговые агроэкосистемы – источник воспроизводства энергии в биосфере [Grassland agroecosystems – source of energy reproduction in the biosphere]. Кормопроизводство. Но 6 с. 8–11.
- KUTUZOVA A. A., TROFIMOVA L. S., PROVORNAYA E. E. 2011. Новый метод энергетической оценки луговых агроэкосистем. В: Программа и методика проведения научных исследований по луговодству (по Межведомственной координационной программе НИР Россельхозакадемии на 2011–2015 гг.) [New method for energy evaluation of meadow agroecosystems In: Program and methodology of scientific research on the grassland (on Interdepartmental coordination research program for 2011–2015 RAAS.)]. Ed. A. A. Kutuzova, K. N. Privalova. Москва. ФГУ РЦСК с. 128–163.
- KUTUZOVA A. A., TROFIMOVA L. S., PROVORNAYA E. E. 2015. Методика оценки потоков энергии в луговых агроэкосистемах [Methodology to evaluate flow of energy in the meadow agroecosystems]. 3-е изд., перераб. и дополн. Москва. Угрешская типография сс. 32.
- МІКНАЙЛІЧЕНКО В. Р., КУТУЗОВА А. А., НОВОСЕЛОВ Ю. К., ЗОТОВ А. А., БОНДАРЕВ В. А., ТАШЧИЛИН В. А., ТЕБЕРДИЕВ Д. М., ЯКУШЕВ Д. В., ШПАКОВ А. С., ШИП В. В., ПЕРЕПРАВОВ Н. І., ВОЛКОВ Н. Р., ШИШЕРБАКОВ М. Ф., МАКАРОВА Т. І., ШЕВТОВ А. В., НАСОНОВ Н. В., ФРАНТСЕВА А. А., МЕРШЕВАЯ В. Н., МАРЧЕНКО О. С. 1995. Методическое пособие по агроэнергетической и экономической оценке технологий и систем кормопроизводства

- [Methodical manual for the agroenergy and economic evaluation of technologies and fodder production systems]. Москва. РАСХН сс. 173.
- МІКНАУЛІЧЕНКО В. Р., ШИРАКОВ А. С., КУТУЗОВА А. А. 2000. Методическое пособие по агро-энергетической оценке технологий и систем ведения кормопроизводства [Methodical manual for the agroenergy and economic evaluation of technologies and systems conducting fodder production]. Москва. РАСХН сс. 52.
- ОДУМ Ю. 1975. Основы экологии [Fundamentals of ecology]. Пер. с 3-го англ. изд. Москва. Мир сс. 742.
- ШИР В. В. 1990. Повышение продуктивности бобово-злаковых пастбищ путем периодического известкования и фосфоритования дерново-подзолистых почв в Центральном районе Нечерноземной зоны [Increased productivity of legume-grass pastures through periodic liming and Phosphoriting sod-podzolic soils in the Central region Non-chernozem zone]. Автореферат диссертации канд. с.-х. наук. Москва. ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса сс. 16.
- ЗНУСЧЕНКО А. А. 1980. Экологическая генетика культурных растений [Ecological genetics of cultivated plants]. Кишинев. Штиинца сс. 588.
- ЗНУСЧЕНКО А. А. 1994. Стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства [The strategy of adaptive intensification of agriculture]. Пушино сс. 148.

Anelya A. KUTUZOVA, Lyudmila S. TROFIMOVA, Elena E. PROVORNAYA

METHODOLOGICAL BASES AND INDUSTRIAL-ENVIRONMENTAL ASSESSMENT RESULTS ENERGY FLOW IN THE MEADOW AGROECOSYSTEMS

Key words: *anthropogenic costs, gross energy, methodology, meadow agroecosystems, metabolic energy*

S u m m a r y

The article presents methodological basis for definition of gross energy flows in grasslands agroecosystems (aboveground and underground mass, soil fertility). Showed methodical approach to the evaluation of total anthropogenic energy expenditure for different technologies and the production of gross energy in a single indicator for the SI system. In the examples given in the tables, produced in length of stationary experiments on meadows cultivation, shows the leading role natural renewable energy sources (use of solar energy, biological characteristics of renewable phytocenoses itself, biogenic environmental factors etc.) and in general, the role grassland agroecosystems in modern biospheric processes. At the same time, the production of metabolic energy (physiologically available to animals) and collecting it in a costs per anthropogenic can predict the economic efficiency of new reception and technologies developed in the fodder production. The methodology can be used not only for research cultivation of meadows, but also in other crop production.

Anelya A. KUTUZOVA, Lyudmila S. TROFIKOVA, Elena E. PROVORNAYA

METODYCZNE PODSTAWY I PRODUKCYJNO-EKOLOGICZNE ASPEKTY OCENY STRUMIENI ENERGII W AGROEKOSYSTEMACH ŁĄKOWYCH

Słowa kluczowe: *agroekosystem łąkowy, energia całkowita, energia strawna, metodyka, nakłady energii antropogenicznej*

Streszczenie

W publikacji przedstawiono metodyczne podstawy określania strumieni energii w agroekosystemach łąkowych (nadziemna i podziemna biomasa, żyzność gleby) obejmujące ocenę całkowitych nakładów energii antropogenicznej w odniesieniu do różnych technologii i produkcji energii całkowitej wyrażonej za pomocą wskaźników zgodnych z systemem SI. Na przedstawionych przykładach uzyskanych na podstawie wieloletnich stacjonarnych doświadczeń łąkarskich wykazano wiodącą rolę naturalnych, odnawialnych źródeł energii (wykorzystanie energii słonecznej, biologicznej specyfiki samoodnawiających się fitocenoz, biogennych czynników środowiska itp.) i w ogóle rolę agroekosystemów łąkowych we współczesnych procesach biosfery. Równocześnie na podstawie zbioru energii strawnej (fizjologicznie dostępnej dla zwierząt) w odniesieniu do nakładów antropogenicznych można prognozować ekonomiczną efektywność nowych technologii produkcji pasz. Przedstawioną metodykę można stosować nie tylko w badaniach łąkarskich, lecz również w innych rodzajach produkcji roślinnej.

Adres do korespondencji: проф. Анэля Александровна Кутузова, Всероссийский научно-исследовательский институт кормов имени В. Р. Вильямса, 141055, Россия, г. Лобня, Московской области, Научный городок, корпус 1; тел.: 8-495-577-73-37, факс: 8-495-577-71-07, e-mail: lstrofi@mail.ru