

УДК 631.4

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ И АГРОЛАНДШАФТАХ

© 2012 г. Г.А. Булаткин

*Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино Московской обл., ул. Институтская, 2, Россия
E-mail: sadovod@rambler.ru*

Поступила в редакцию 02.11.2011 г.

Разработана модель анализа структуры потоков энергии в агроэкосистемах и агроландшафтах с учетом ее качества, которая дает объективную картину соотношения различных видов энергии и позволяет оценить суммарную величину поступающей энергии. На примере озимой пшеницы и кукурузы, возделываемых на серых лесных почвах показано, что величины потоков антропогенной энергии в модельных агроэкосистемах сопоставимы с величиной входящей солнечной радиации даже при средних дозах минеральных удобрений. Проведены исследования входящих и выходящих потоков энергии органического вещества в модельном лесо-аграрном ландшафте в южном Подмоскovie с учетом качества энергии.

Ключевые слова: потоки энергии, агроэкосистема, агроландшафт, модель анализа.

ВВЕДЕНИЕ

Современная цивилизация в основном базируется на использовании солнечной энергии, запасенной зелеными растениями древней биосферы и содержащейся в недрах Земли в виде каменного угля, нефти, газа, горючих сланцев и других невозобновляемых источников энергии.

С позиций энергетики сельское хозяйство – особая форма деятельности общества по преобразованию солнечной радиации в энергию макроэргических связей органического вещества. Автотрофные растительные организмы, поглощая и преобразуя энергию Солнца, накапливают ее в химических связях различных соединений.

Энергетика природных систем обусловлена поступлением тепловой, прежде всего солнечной энергии, атмосферных осадков, механическим перемещением косного вещества, активностью живого вещества [1], а также эндогенным теплом Земли [2].

В природных ландшафтах реализуются фактически 3 основных входящих потока энергии: солнечная радиация, энергия разложившегося гумуса почвы и растительной биомассы.

Для создания, поддержания структуры и обеспечения условий функционирования агроэкосистем вкладывается дополнительная антропогенная (техническая) энергия. В работе [3]

справедливо указано, что естественный энергетический баланс природного ландшафта формируется за счет солнечного излучения, образования органических веществ почвы и является основой его саморегулирования, а в агроэкосистемах значительная часть энергии привносится человеком.

Величина вложенной технической энергии складывается из затрат на производство, транспортировку и внесение минеральных и органических удобрений, использование топлива тракторами, транспортными средствами, изготовление, обслуживание большого количества различной сельскохозяйственной техники, затрат на семена и на выведение новых сортов культур, различные виды мелиорации.

Разнообразие видов энергоносителей, используемых в аграрной сфере, затрудняет оценку вклада каждого вида энергии в суммарном входящем энергетическом потоке. Объективная оценка величин затрат энергии различных энергоносителей в агроэкосистемах и агроландшафтах и совокупного энергетического ресурса имеет большое значение, т.к. позволяет выявить роль каждого потока энергии в формировании продуктивности и устойчивости системы, сопоставить их по эффективности регуляторного воздействия.

Поскольку в научной литературе имеются разночтения в понятии “агроэкосистема”, автор приводит свое определение этого объекта исследований [4].

Агроэкосистема – это пространственно ограниченная, искусственно созданная, нестабильная, взаимосвязанная совокупность биотических и частично измененных абиотических компонент, характерной особенностью которой является относительно устойчивое функционирование во времени при наличии постоянного входящего потока антропогенной энергии, существующая для получения заранее определенного количества растительной сельскохозяйственной продукции.

По мнению автора, агроэкосистема включает в себя однородный (одновидовый или многовидовый) однолетний или многолетний культурный фитоценоз вместе с почвой, ее животным миром и микробиоценозом, орнитофауну, приземной слой атмосферы и находится в границах сельскохозяйственного поля или рабочего участка. Нижней границей агроэкосистемы можно считать уровень грунтовых вод первого водоносного горизонта.

Управление в агросфере ведется извне и подчинено целям человека [5]. Однако агроэкосистема, агроландшафт, как природно-антропогенные системы, имеют биогеоценотические и биогеохимические механизмы и структуры саморегуляции [3], и их необходимо использовать для сокращения затрат антропогенной энергии.

В научных исследованиях оказалось сложно соотнести величины различных форм энергии, поступающей в аграрную сферу. Считают [3], что величина энергии солнечного излучения составляет около 99% суммарного входящего потока энергии в агроэкосистему или агроландшафт. Автор работы [3] полагает, что антропогенная энергия в агроэкосистемах представляет собой относительно малые потоки. При этом он совершенно справедливо видит главный смысл всех техногенных факторов в управлении процессом утилизации зелеными растениями неисчерпаемых ресурсов Солнца и атмосферы с целью увеличения продукционных и средообразующих свойств агрофитоценозов. В то же время автор пишет, что было бы необоснованно рассматривать агроэкосистемы и агроландшафты как преимущественно природные геосистемы прежде всего в силу действительно высокой зависимости их нормального функционирования от затрат антропогенной энергии.

Эта противоречивость в оценке соотношений различных видов входящих потоков энергии в агроэкосистемы требует подробного обсуждения, разработки методологии и новых методических подходов к их анализу.

В настоящее время исследователи, пытаясь учесть суммарное использование энергии в агро-

экосистемах и в агросфере в целом, подходят к этой сложной проблеме упрощенно.

Уже были предприняты некоторые попытки оценить суммарный входящий поток энергии в аграрные территории. Например, предложена упрощенная интегральная оценка системы земледелия, которая выражается через показатель производительности системы на единицу совокупного энергетического ресурса [6]. Этот показатель находится простым суммированием энергии ФАР Солнца, энергии органического вещества почвы и поступающей антропогенной энергии, участвующей в процессе производства.

Оценка включает следующую систему показателей:

$$K_{oc} = \frac{E_{\phi} \pm \Delta E_{п}}{(E_{ФАР} + E_{ОВП} + E_a \cdot T)}, \quad (1)$$

где K_{oc} – показатель производительности оцениваемой агроэкосистемы на единицу ресурса (МДж/день/ГДж); E_a – энергия произведенной фитомассы (МДж); $\Delta E_{п}$ – изменение энергии органического вещества почвы за период (МДж), $E_{ФАР}$ – энергия фотосинтетически активной радиации (ГДж), $E_{ОВП}$ – энергия органического вещества почвы на начало периода (ГДж), E_a – антропогенная энергия (энергия на возделывание сельскохозяйственных культур) (ГДж), T – период вегетации, или вегетационный период (сут).

Таким образом, автор пытается соотнести энергетические ресурсы агроэкосистемы простым суммированием входящих и выходящих потоков различных видов энергии.

Однако в расчетах совокупного энергетического ресурса необходимо учитывать всю суммарную приходящую солнечную, а не только фотосинтетически активную радиацию [3]. Тепловая энергия Солнца оказывает большое влияние на интенсивность физиологических процессов в растениях, тургор и фотосинтез листьев, биогеохимическое преобразование косного вещества почв, перемешивание приземного слоя воздуха, формирование атмосферных осадков, испарение влаги, а также энергетический потенциал почвообразования [7, 8].

Исследования в полевых агроэкосистемах выявили большую роль увеличения потока технической энергии (в основном в виде минеральных удобрений) в повышении урожая при неизменном приходе солнечной радиации [9]. Это вызывает необходимость более подробного рассмотрения правомерности упрощенного подхода к анализу соотношения потоков энергии. Цель работы – разработка модели анализа структуры

потоков энергии в агроэкосистемах и агроландшафтах с учетом ее качества, которая даст объективную картину соотношения различных видов энергии и позволит оценить суммарную величину поступающей энергии.

ПОТОКИ ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ И АГРОЛАНДШАФТАХ

Анализ научной литературы показал, что наиболее близко к решению проблемы корректного расчета совокупного энергетического ресурса территории подошли Н. Odum, Е. Odum (цит. по [5]), когда ввели коэффициенты качества энергии. Они полагали, что качество энергии измеряется ее количеством, или, говоря точнее, количеством определенного вида энергии, затрачиваемым на получение другого типа в цепи превращений энергии. Все формы энергетических процессов можно соотнести друг с другом. Для большинства форм энергии найдены эквиваленты преобразования, которые определяют, какое количество энергии одного вида эквивалентно определенному количеству другого вида (табл. 1). Энергия поступает на Землю от Солнца и поглощается при нагревании озер и морей, при росте растений, возникновении ветров и атмосферных осадков, косвенно участвует в образовании гумуса, угля, нефти и газа.

Показано, что для образования 1 кал валовой продукции растений требуется около 100 кал солнечной энергии. Для горючих ископаемых предлагается соотношение 1 : 2000. Таким образом, в предложенных пропорциях отражается фактическая накопленная энергия солнечной радиации в различных физических энергоносителях. Однако последующие исследователи практически не использовали в своих работах предложенный методический подход. Есть только ссылка на понятие

“качество энергии”, которое используют в технике.

Автором разработана модель и математическая формула расчета суммарной величины затрат энергии на производство продукции сельскохозяйственных культур, принимая во внимание способность энергии выполнять работу.

Формула позволяет привести потоки энергии в сопоставимый вид и дает возможность корректно оценить роль различных видов использованной энергии.

Уравнение имеет следующий вид:

$$\Sigma_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\text{солн. рад.}} + 4 \mathcal{E}_{\Sigma} + 10^2 \mathcal{E}_{\text{п. орг. в-ва}} + n \cdot 10^2 \mathcal{E}_{\text{гумуса}} + 2 \cdot 10^3 \mathcal{E}_{\text{антр.}} \quad (2)$$

где Σ_{Σ} – суммарный энергетический поток, МДж/га; $\mathcal{E}_{\text{солн. рад.}}$ – входящая солнечная радиация за период вегетации культуры (при температуре > 5 °С); \mathcal{E}_{Σ} – кондуктивный и конвективный потоки тепла из недр Земли в агроэкосистему за год; $\mathcal{E}_{\text{п. орг. в-ва}}$ – энергия органического вещества удобрений, пожнивных, корневых остатков, корнепада и эксудатов, поступивших в корнеобитаемый слой почвы; $\mathcal{E}_{\text{гумуса}}$ – энергия гумуса почвы, потерянного при внутрипочвенных процессах. Параметр n связан с величиной коэффициента гумификации растительных остатков, которая существенно изменяется для различных культур. По данным [10], для растительных остатков зерновых культур и многолетних трав этот коэффициент равен 25% ($n = 4$), для кукурузы и других силосных культур – 15% ($n = 6$), соломы на удобрение – 25%; $\mathcal{E}_{\text{антр.}}$ – антропогенная энергия, использованная непосредственно на территории агроэкосистемы или во всей технологической цепочке. В приведенной формуле коэффициенты даны по солнечному эквиваленту.

С учетом качества энергии сделаны расчеты структуры входящих потоков энергии на примере двух типичных сельскохозяйственных культур, возделываемых на серых лесных почвах в южном Подмосковье: озимой пшеницы и кукурузы на силос при различной интенсивности удобренности. Агрохимическая характеристика почв, условия и методика проведения полевых опытов описаны ранее [9]. Расчет влияния минеральных удобрений на потери гумуса почвы проводили с учетом поправочных коэффициентов [11]. Величину пожнивных и корневых остатков культурных растений определяли экспериментальным путем. Прижизненные выделения органических веществ растениями в почву и корнепад оценивали в сред-

Таблица 1. Коэффициенты качества энергии

Типы энергии	Солнечный эквивалент, кал
Солнечный свет	1.0
Валовая продукция растений	100
Чистая продукция в виде древесины	1000
Горючие ископаемые (подготовленные к использованию)	2000
Энергия поднятой воды	6000
Электричество	8000

Таблица 2. Поступление различных видов энергоносителей в агроэкосистемы озимой пшеницы и кукурузы на серых лесных почвах (среднее за 5 лет)

Культура	Минеральные удобрения, <u>д.в.</u> урожай, ц/га	Суммарная солнечная радиация за период вегетации культуры, МДж/га	Пожнивные и корневые остатки, экосулаты и корнепад, т/га	Окисленный гумус почвы, т/га	Семена, ц/га	Техническая энергия, МДж/га
Озимая пшеница, зерно*, солома**	без удобрений (контроль) 33.1*, 32.3**	2096·10 ⁴	3.96	2.56	2.5	8190
	<u>N40P40K40</u> 38.1*, 42.2**	2096·10 ⁴	4.51	2.72	2.5	13800
	<u>N135P150K110</u> 41.0*, 52.1**	2096·10 ⁴	4.54	3.10	2.5	23200
Кукуруза на силос, скошенная биомасса	без удобрений (контроль) 384	1868·10 ⁴	2.46	2.96	0.5	4970
	<u>N90P60K40</u> 516	1868·10 ⁴	2.87	3.32	0.5 ц/га	16600
	<u>N150P190K190</u> 630	1868·10 ⁴	3.03	3.56	0.5	28600

* Зерно – при 14%-ной влажности, ** солома – при 20%-ной влажности. То же в табл. 3.

нем в 1/3 от суммарной продуктивности фотосинтеза [12].

Приведены величины поступления различных видов энергоносителей в экспериментальные агроэкосистемы (табл. 2). Показано, что для технической энергии в агроэкосистемах озимой пшеницы большие затраты связаны с проведением технологических операций по уборке соломы на поле: подборе и прессовании соломы, подборе тюков, перевозке и складировании тюков на краю поля.

Расчеты, проведенные по общепринятой методике, свидетельствовали, что в посевах озимой пшеницы, например, при внесении минеральных удобрений в дозе N40P40K40 без учета качества энергии солнечная радиация составляет 99.5% суммарного энергетического потока.

Анализ структуры потоков энергии с учетом ее качества показал иную закономерность (табл. 3). Величина вложений антропогенной энергии непосредственно на поле с озимой пшеницей в варианте N40P40K40 оценена в 2760 · 10⁴ МДж/га. Солнечная радиация за период вегетации культуры составила 40.4% суммарного входящего энергетического потока, 1.8% приходилось на

энергию растительного органического вещества пожнивных и корневых остатков, 4.4% – на энергию разложившегося гумуса и 53.3% – на антропогенную энергию.

В посевах кукурузы в варианте N90P60K40 солнечная радиация занимала 33.8% суммарного энергетического потока, пожнивные и корневые остатки – 1.1%, энергия окисленного почвенного гумуса – 5.0% и антропогенная энергия – 60.0%.

Таким образом, величины потоков антропогенной энергии на поле экспериментальных агроэкосистем были сопоставимы с величиной входящей солнечной радиацией даже при средних дозах минеральных удобрений.

Если же учитывать энергозатраты на транспортировку и доработку урожая, то величина использованной технической энергии существенно возрастает.

Необходимым условием получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур является воспроизводство почвенного плодородия (компенсация эрозионных потерь гумуса и питательных веществ, восстановление содержания разложившегося гумуса, затраты на

нейтрализацию кислотности почв, вызванной внесением минеральных удобрений и т.д.). На простое воспроизводство параметров почвенного плодородия после возделывания озимой пшеницы в варианте N40P40K40 необходим поток антропогенной энергии в размере 3867 МДж/га или $773 \cdot 10^4$ МДж/га в солнечном эквиваленте. Совокупные затраты технической энергии (на посев и выращивание, уборку, транспортировку и доработку продукции, а также восстановление почвенного плодородия) при производстве 38.1 ц/га зерна и 42.2 ц/га соломы составили 31 317 МДж/га или $6263 \cdot 10^4$ МДж/га в солнечном эквиваленте.

Таким образом, расчет потока антропогенной энергии с общебиосферных позиций показал, что он, как по величине, а тем более по роли, которую он играет в создании, поддержании функционирования и структур агроэкосистем, соизмерим с приходящей солнечной радиацией.

Для посевов солнечная и антропогенная энергия равнозначны и необходимы, и существование культурных фитоценозов в полевых условиях невозможно в отсутствии каждого из них.

Важным вопросом в земледелии является сохранение плодородия почв. Продуктивность агроэкосистем во многом определяется содержи-

ем гумуса в почвах. Одним из путей сохранения плодородия почв является предотвращение смыва почв и потерь органических веществ и энергии с эрозионным материалом и жидким стоком с аграрных территорий.

Для оценки баланса энергии в ландшафтах, в том числе и агроландшафтах, необходимы методические разработки и изучение входящих и выходящих потоков энергии различных видов органического вещества. В качестве примера приведен один из результатов исследований потоков энергии в модельном лесо-аграрном ландшафте в южном Подмосковье (табл. 4).

На территории возделывали следующие полевые культуры: озимую пшеницу (300.5 га), ячмень (143.9 га), кукурузу на силос (97.1 га), картофель (112 га), многолетние травы 1-го года пользования (102.5 га).

Под кукурузу в анализированном году было внесено 3 тыс. т навоза. Расчеты показали, что с органическим веществом семян этих культур приход энергии составил 3860 ГДж/год. После уборки урожая культур с корневыми и пожнивными остатками в почву поступило 22 800 ГДж энергии или 2840 ГДж/100 га пашни. Суммарный входящий поток энергии органического вещества составил 40 300 ГДж на всю площадь бассейна

Таблица 3. Поступление энергии в агроэкосистемы озимой пшеницы и кукурузы на серых лесных почвах с учетом качества энергии (среднее за 5 лет)

Культура	Минеральные удобрения, д.в. урожай, ц/га	Суммарная солнечная радиация за период вегетации культуры	Поживные и корневые остатки, эксудаты и корнепад	Окисленный гумус почвы	Семна	Техническая энергия	Всего
Озимая пшеница, зерно*, солома**	без удобрений	2100	82.8	214	5.2	1640	4040
	33.1*, 32.3**	51.9	2.1	5.3	0.1	40.6	100
	N40P40K40	2100	94.3	227	5.2	2760	5180
	38.1*, 42.2**	40.4	1.8	4.4	0.1	53.3	100
	N135P150K110	2100	94.9	259	5.2	4630	7090
	41.0*, 52.1**	29.6	1.3	3.7	0.1	65.3	100
Кукуруза на силос, скошенная масса	без удобрений	1870	51.4	248	1.0	995	3160
	384	59.0	1.6	7.8	0.1	31.5	100
	N90P60K40	1870	60.0	278	1.0	3310	5520
	516	33.8	1.1	5.0	0.1	60.9	100
	N150P190K190	1870	63.3	298	1.0	5720	7950
	630	23.5	0.8	3.7	0.1	71.9	100

Таблица 4. Основные потоки энергии в бассейне р. Любожиха, ГДж

По- токи	Показатели	На всю площадь бассейна (1900 га)	На 100 га	
			площади бассейна	пашни бассейна
Входящие потоки				
1 ¹	Суммарная солнечная радиация в т. ч. ФАР за период > 5 °С	72000 · 10 ³ 28300 · 10 ³	3790 · 10 ³ 1490 · 10 ³	3790 · 10 ³ 1490 · 10 ³
2 ¹	Органические удобрения	12000	631	1500
3 ¹	Семена сельскохозяйственных культур	3860	203	483
4 ¹	Органические вещества, вымытые атмосферными осадками из полога зерновых культур	1600	84.3	200
5 ¹	Корневые и пожнивные остатки сельскохозяйственных культур	22800	1200	2860
6 ¹	Итого (сумма потоков 2 ¹ –5 ¹)	40300	2120	5040
Выходящие потоки				
1	Отчуждение с продукцией агроэкосистем	45 700	2400	5710
2	Вынос с лесными грибами	14.6	0,77	–
3	Потери с гумусовыми веществами твердого стока реки	348	18.3	43.5
	Потери с гумусовыми веществами твердого стока реки с учетом качества энергии	1392	73.3	174
4	Потери со стоком водорастворимых органических веществ	860	34.7	107.5
5	Вынос с гумусом при технологической эрозии;	320	16.8	40.0
	Вынос с гумусом при технологической эрозии с учетом качества энергии	1280	67.4	160
6	Потери гумуса пашни при внутрипочвенном окислении;	29 600	–	3700
	Потери гумуса пашни при внутрипочвенном окислении с учетом качества энергии	117 000	–	15 000
7	Итого (сумма потоков 3–6)	39 000	487	3900
	Итого (сумма потоков 3–6 с учетом качества энергии)	122 000	593	15 000

или 5040 ГДж/100 га пашни. На основе данных размеров посевных площадей культур, их продуктивности оценили вынос энергии урожаями культурных растений.

С урожаями основной и побочной продукции из ландшафта отчуждено 45 700 ГДж энергии или 5710 ГДж/100 га пашни. Таким образом, в экспериментальный бассейн за год поступило энергии органического вещества несколько меньше, чем вынесено ее с товарной и побочной продукцией культурных растений. Выходящие потоки энергии из ландшафта за счет различных видов эрозийных процессов составили очень большую величину. При анализе потерь необходимо учитывать качество энергии, т. е. количество энергии определенного энергоносителя, затраченное на получение энергии другого энергоносителя.

Действительно, если рассчитывать потери энергии из ландшафта, исходя из простого суммирования выноса энергии массой гумусовых веществ твердого стока, стока водорастворимых органических веществ, гумуса почвы, отчуждаемого при уборке картофеля (технологическая эрозия), а также уменьшения содержания гумуса в почвах агроэкосистем за счет внутрипочвенных процессов окисления, то общая величина потерь энергии составит 38 900 ГДж.

Простое сравнение входящих потоков энергии органического вещества (5040 ГДж/100 га пашни) и непродуктивных выходящих потоков энергии (3900 ГДж/100 га пашни) может привести к ошибочному выводу о преобладании поступления энергии в почвы над потерями.

Известно, что коэффициент гумификации в почве органического вещества навоза, пожнив-

ных и корневых остатков не превышает 25%. На образование 1 т гумусовых веществ требуется около 4 т растительного органического вещества. С учетом качества входящей и выходящей энергии обнаружена отрицательная направленность энергетических потоков в ландшафте (табл. 4).

Суммарные потери энергии из агроландшафта с учетом ее качества оценены в 122 тыс. ГДж или в 3 раза больше, чем поступило энергии в почву с органическими удобрениями, пожнивными и корневыми остатками и семенами сельскохозяйственных культур. В результате этих процессов происходит истощение запасов энергии в почвах агроэкосистем, что приводит к нарушению круговорота питательных веществ, снижению биологической и геохимической активности почв. На примере модельного агроландшафта показано, что применение нового методического подхода к анализу входящих и выходящих потоков энергии органического вещества выявило резкий дефицит энергии, который необходимо сократить внесением органического вещества в почву в различной форме и уменьшением потерь в основном за счет внутрпочвенных процессов окисления гумуса и водозероизонного выноса. Пополнение пула органического вещества почв эффективно с помощью посева сидератов, как более энергоэкономного по затратам технической энергии приема по сравнению с использованием навоза [9].

Предполагают [3], что экономия технической энергии возможна также на основе “конструирования” агроэкосистем и агроландшафтов с помощью их адаптивного размещения во времени и пространстве, повышения их видового и сортового разнообразия, временной и пространственной оптимизации фотосинтетической поверхности, более широкого вовлечения в интенсификационные процессы всех биологических компонент (почвенной микрофлоры, орнито- и энтомофауны и др.), более дифференцированного использования адаптивного потенциала культурных видов и сортов растений.

Однако “конструирование” посевов всегда требует и дополнительных затрат антропогенной энергии. “Конструирование” в целом – это антропогенное управление агроэкосистемой. Задача человека состоит в том, чтобы энергетическая и экономическая эффективность суммы приемов интенсификации, как за счет техногенных факторов, так и за счет биологизации и экологизации производства в агросфере, повышались. В противном случае все “конструирование” агроэкосистем будет нецелесообразным. В связи с этим необходима закладка хотя бы небольших поли-

вариантных натуральных моделей посевов в различных почвенно-климатических зонах, сконструированных по упомянутым выше принципам, проведение энергетического и экономического анализа полученных результатов и по результатам исследований построение и использование наиболее эффективных структур агроэкосистем и агроландшафтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование потоков энергии в агроэкосистемах и агроландшафтах с учетом ее качества дает реальную оценку веса отдельных составляющих суммарного потока энергии и направленности энергетических процессов, происходящих на аграрной территории.

Разработанная модель показывает структуру поступающих потоков энергии с учетом ее качества, дает объективную картину соотношения различных видов энергии и позволяет оценить суммарную величину поступающей энергии в агроэкосистемы.

Солнечная радиация во входящем энергетическом потоке при средней удобренности экспериментальных агроэкосистем составила: для озимой пшеницы – 40.4%, для кукурузы на силос – 33.8%. Доля технической энергии была равна 53.3% для озимой пшеницы и 60.0% – для кукурузы на силос от суммарного поступления энергетических ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Мельченко В.Е.* Устойчивость природных территориальных комплексов – базовая компонента устойчивого развития страны // Экологическая парадигма: выбор России в III тысячелетии. Научн. тр. МНЭПУ. Вып. 2. 1998. С. 78–91.
2. *Череменин Г.А.* Геотермия. Л.: Недра, 1972. 272 с.
3. *Жученко А.А.* Адаптивное растениеводство (эколого-энергетические основы): теория и практика. Т. 1. М.: Агрорус, 2008. 814 с.
4. *Булаткин Г.А., Ларионов В.В.* Основы энергетической концепции агротехногенной нагрузки. Препринт. Пушкино: ОНТИ НЦБИ РАН, 1992. 24 с.
5. *Одум Ю.* Экология. В 2-х т. Т. 1. М.: Мир, 1986. 328 с.
6. *Володин В.М.* Агроэкологические основы регулирования почвенного плодородия: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Минск, 1991. 59 с.

7. Иванов К.П. Энергетические проблемы жизни // Вестн. РАН. 2010. Т. 80. № 8. С. 698–703.
8. Волобуев В.Г. Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. 116 с.
9. Худяков О.И. Почвы лесостепи Внутренней Азии. М., 2009. 325 с.
10. Булаткин Г.А. Эколого-энергетические основы воспроизводства плодородия почв и повышения продуктивности агроэкосистем. М.: НИИ-Природа, 2008. 366 с.
11. Лыков А.М. К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии // Изв. ТСХА. 1979. Вып. 6. С. 14–20.
12. Кудеяров В.Н. Интенсивность процессов азотного цикла в почве при применении азотных удобрений // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1982. № 5. С. 660–669.
13. Умаров М.М. Несимбиотическая азотфиксация в фитоплане и ее роль в балансе азота в почве // Экологические последствия применения агрохимикатов (удобрений). Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1982. С. 42–43.

Methodological Principles of the Analysis of Energy Fluxes in Agroecosystems and Agrolandscapes

G. A. Bulatkin

*Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences,
ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia,
E-mail: sadovod@rambler.ru*

A model analysis of the structure of energy fluxes in agroecosystems and agricultural landscapes was developed, which is capable of objectively estimating the relationships between different forms of energy and allows assessing the total value of the incoming energy. With winter wheat and corn cultivated on gray forest soils as an example, it was shown that the anthropogenic fluxes of energy in model agroecosystems are comparable with the value of incoming solar radiation, even at moderate application rates of mineral fertilizers. The incoming and outgoing fluxes of organic matter energy in a model forest-agricultural landscape in the southern Moscow region were studied with consideration for the quality of energy.
Key words: energy fluxes, agroecosystem, agrolandscape, model analysis.

Сдано в набор 00.00.2010 Подписано к печати 00.00.2010 Формат бумаги 60 × 88 ¹/₈
Цифровая печать Усл.печ.л. 00,0 Усл.кр.-отт. 0,0 тыс. Уч.-изд.л. 00,0 Бум.л. 0,0
Тираж 000 экз. Зак. 000

Учредитель: Российская академия наук

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”. 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
Оригинал-макет подготовлен АИЦ “Наука” РАН
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”. 121099 Москва, Шубинский пер., 6