

Какова структура суммарного потока энергии в агроэкосистеме, идущего на получение урожая культурных растений? Ответ на этот вопрос важен для рационального ведения сельскохозяйственного производства. В публикуемой ниже статье анализируются потоки энергии в агроэкосистемах. На примере типичных агроэкосистем, возделываемых на серых лесных почвах, показано, что величина потока антропогенной энергии сопоставима с величиной входящей солнечной радиации.

АНАЛИЗ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Г.А. Булаткин

Современная цивилизация базируется на использовании солнечной энергии, запасённой зелёными растениями древних биосфер 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 органического вещества. Растения, поглощая и преобразуя энергию Солнца, накапливают её в химических связях различных соединений, затем растительное вещество трансформируется и депонируется в недрах Земли.

Энергетика природных систем обусловлена поступлением тепловой, прежде всего солнечной, энергии, фотосинтетически активной радиации и атмосферных осадков, а также потенциальной энергии перемещения косного вещества, активностью живого вещества [1], эндогенным теплом Земли [2]. В природных ландшафтах реализуются три основных входящих потока: солнечная радиация, энергия разложившегося гумуса и растительной биомассы. Для создания, поддержания структуры и обеспечения условий функционирования агроэкосистем вкладывается дополнительная антропогенная (техническая) энергия. А.А. Жученко справедливо пишет, что естественный энергетический баланс природного

ландшафта формируется за счёт солнечного излучения, образования органических веществ почвы и является основой саморегулирования ландшафта, а в агроэкосистемах значительная часть энергии привносится человеком [3]. Величина вложенной технической энергии складывается из затрат на производство, транспортировку, внесение минеральных и органических удобрений, использование топлива различными транспортными средствами, изготовление и обслуживание большого количества сельскохозяйственной техники, семян, а также затрат на выведение новых сортов и мелиорацию.

Разнообразие энергоносителей, используемых в аграрной сфере, затрудняет определение вклада каждого вида энергии в суммарном входящем энергетическом потоке. В то же время объективная оценка величин затрат энергии различных энергоносителей в агроэкосистемах и совокупного энергетического ресурса имеет большое значение, так как позволяет выявить роль каждого потока энергии в формировании продуктивности и устойчивости системы, сопоставить их по эффективности регуляторного воздействия.

Следует сказать, что качество энергии в биологии до нашей публикации [4], вероятно, не принималось во внимание. В последнее время появилась важная работа [5], показывающая энергетическую цену жизни с учётом её качества, источников энергии и основные статьи расхода энергии.

Поскольку в научной литературе имеются разночтения в понятии “агроэкосистема”, приведу своё определение. Агроэкосистема – пространственно ограниченная, искусственно созданная, нестабильная, взаимосвязанная совокупность биотических и частично изменённых абиотических компонентов, характерной особенностью которой является относительно устойчивое функционирование во времени при наличии постоянного входящего потока антропогенной



БУЛАТКИН Геннадий Александрович – доктор биологических наук, старший научный сотрудник Института фундаментальных проблем биологии РАН.

энергии, и существующая для получения заранее определённого количества растительной сельскохозяйственной продукции [6]. Агроэкосистема включает в себя однородный (одновидовой или многовидовой) однолетний или многолетний культурный фитоценоз вместе с почвой, её животным миром и микробоценозом, орнитофауну, приземный слой атмосферы, существующие в границах сельскохозяйственного поля или рабочего участка. Нижней границей агроэкосистемы можно считать уровень грунтовых вод первого водоносного горизонта. Управление в агросфере ведётся извне и подчинено целям человека. Однако агроэкосистема как природно-антропогенная система имеет собственные биогеоценозические и биогеохимические механизмы, структуры саморегуляции, их необходимо использовать для сокращения затрат антропогенной энергии.

В научных исследованиях сложно соотнести величины различных форм энергии, поступающей в аграрную сферу. Так, считается, что величина энергии солнечного излучения составляет около 99% суммарного входящего потока энергии в агроэкосистему [3]. Автор цитируемой работы полагает, что антропогенная энергия в агроэкосистемах представляет собой относительно малые потоки. При этом он настаивает, что техногенное воздействие необходимо “для управления процессом утилизации зелёными растениями неисчерпаемых ресурсов Солнца и атмосферы с целью увеличения продукционных и средообразующих свойств агрофитоценозов” [3]. В то же время он пишет, что 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 их анализа. В настоящее время исследователи, пытаясь учесть суммарное использование энергии в агроэкосистемах и агросфере в целом, подходят к данной проблеме упрощённо. Уже были некоторые попытки оценить суммарный входящий поток энергии на аграрных территориях. Так, предложена упрощённая интегральная оценка системы земледелия, которая выражается через показатель производительности системы на единицу совокупного энергетического ресурса. Этот показатель находится простым суммированием энергии фотосинтетической активной радиации Солнца, энергии органического вещества почвы и поступающей антропогенной энергии, участвующей в

процессе производства. Оценка включает следующую систему показателей:

$$K_{oc} = \frac{E\phi \pm \Delta En}{(E\phi_{ap} + E_{obn} + E_a) \times T}, \quad (1)$$

где K_{oc} – показатель производительности оцениваемой агроэкосистемы на единицу ресурса (МДж/день/ГДж); $E\phi$ – энергия произведённой фитомассы (МДж); ΔEn – изменение энергии органического вещества почвы за период (МДж); $E\phi_{ap}$ – энергия фотосинтетически активной радиации (ГДж); E_{obn} – энергия органического вещества почвы на начало периода (ГДж); E_a – антропогенная энергия (энергия на возделывание сельскохозяйственных культур) (ГДж); T – период вегетации (дни).

Таким образом, автор пытается соотнести энергетические ресурсы агроэкосистемы простым суммированием входящих и исходящих потоков различных видов энергии. Однако в расчётах совокупного энергетического ресурса необходимо учитывать всю суммарную солнечную радиацию, а не только фотосинтетически активную [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 на энергетический потенциал почвообразования [7, 8]. При этом исследования в полевых агроэкосистемах выявили большую роль увеличения потока технической энергии (в основном в виде минеральных удобрений) в повышении урожая при неизменной солнечной радиации [9]. Это заставляет более подробно рассмотреть правомерность упрощённого подхода к исследованию соотношения потоков энергии.

Анализ научной литературы показал, что наиболее близко к решению проблемы корректного расчёта совокупного энергетического ресурса территории подошли Х. Одум и Е. Одум, когда ввели коэффициенты качества энергии. Они полагали, что качество энергии измеряется её количеством или, говоря точнее, количеством определённого вида энергии, затрачиваемого 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 определённому количеству другого вида (табл. 1). Энергия поступает на Землю от Солнца и поглощается почвой, а также при нагревании озёр и морей, при росте растений, возникновении ветров и атмосферных осадков, косвенно участвует в образовании гумуса, уг-

ля, нефти и газа. Как видно из данных таблицы 1, для образования 1 кал валовой продукции растений требуется около 100 кал солнечной энергии. Для горючих ископаемых предлагается соотношение 1 : 2000. Эти пропорции отражают фактическую накопленную энергию солнечной радиации в различных физических энергоносителях. Однако в дальнейшем исследователи не использовали данный методический подход.

Нами разработана модель и математическая формула расчёта суммарной величины затрат энергии на производство продукции сельскохозяйственных культур с учётом способности энергии выполнять работу. Формула позволяет привести потоки энергии в сопоставимый вид и даёт возможность корректно оценить роль различных видов использованной энергии. Уравнение имеет следующий вид:

$$\Sigma_{\Sigma} = \Theta_{\text{солн. рад.}} + 10^2 \Theta_{\text{л. орг. в-ва}} + n \cdot 10^2 \Theta_{\text{гумуса}} + 2 \cdot 10^3 \Theta_{\text{антр.}} \quad (2)$$

где: Σ_{Σ} – суммарный энергетический поток (МДж/га); $\Theta_{\text{солн. рад.}}$ – приходящая солнечная радиация за период вегетации культуры (при температуре выше $+5^{\circ}\text{C}$); $\Theta_{\text{л. орг. в-ва}}$ – энергия органического вещества удобрений, пожнивных, корневых остатков, корнепада и эксудатов, поступивших в корнеобитаемый слой почвы; $\Theta_{\text{гумуса}}$ – энергия гумуса почвы, потерянного при внутрипочвенных процессах; параметр n связан со значением коэффициента гумификации растительных остатков, который существенно различен для отдельных культур. Так, 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% ($n = 4$); $\Theta_{\text{антр.}}$ – антропогенная энергия, использованная непосредственно на территории агроэкосистемы или во всей технологической цепочке. В приведённой формуле коэффициенты даны по солнечному эквиваленту.

Фактически все органические вещества на Земле являются продуктом трансформации энергии Солнца. На каждом этапе трансформации происходит концентрация энергии (повышение её качества). В агроэкосистемах для их создания, поддержания структуры и функционирования, снижения ограничивающего воздействия на урожай неблагоприятных экологических факторов используется техническая (антропогенная) энергия. Она применяется в различном виде: в форме минеральных удобрений, химических средств защиты растений, в виде топлива для тракторов, комбайнов, автотранспорта и т.д. Существует ещё один входящий поток энергии в экосистемы –

Таблица 1. Коэффициенты качества энергии

Типы энергии	Солнечный эквивалент, кал
Солнечный свет	1
Валовая продукция растений	100
Чистая продукция в виде древесины	1000
Горючие ископаемые (подготовленные к использованию)	2000
Энергия поднятой воды	6000
Электричество	8000

тепло недр Земли. Он стоит особняком от других поступающих потоков.

Если все четыре входящих энергетических потока (пожнивные и корневые остатки, гумус, семена культурных растений, антропогенная энергия) фактически являются продуктами преобразования солнечной энергии или в реальном масштабе времени, или в геологическом времени, то земное тепло имеет другую природу. Его нельзя поставить в один ряд с первыми четырьмя входящими видами энергоносителей, пересчитывая через солнечные эквиваленты трансформации. В последнее десятилетие в научной литературе обращается внимание на существенную роль земного тепла в температурном режиме приземного слоя атмосферы, почв и в формировании видового состава и продуктивности растительных сообществ. По современным представлениям, земное тепло имеет два основных источника: реликтовое тепло и продукт распада радиоактивных элементов в гранитном и базальтовом слоях земной коры.

Солнечное тепло проникает только в самые верхние слои земной коры. На некоторой глубине почво-грунтов, различающейся по районам нашей планеты, устанавливается нулевая амплитуда температуры, то есть прекращается динамика теплового режима под влиянием сезонных изменений температуры воздуха [11]. Так, в Московской области на естественно-безлесной площадке стационара в Сергиевом Посаде, нижняя граница годовых теплооборотов находится на глубине около 12 м и температура пород равна $6.5\text{--}6.9^{\circ}\text{C}$ [12]. В районе этого стационара средняя многолетняя температура воздуха составляет 3.6°C . Глубина промерзания почвы в среднем равна 20 см, на оголённой от снега площадке – около 150 см. Температура подошвы слоя годовых колебаний зависит от количества тепла, поступающего из атмосферы, от плотности восходящих потоков внутреннего тепла Земли, от химических, физических свойств горных пород и процессов, протекающих в литосфере и почве.

Появление дистанционно-геотермического метода космической съёмки земной поверхности, с

помощью которого можно зафиксировать конвективный тепловой поток (КТП) Земли, позволило впервые поставить вопрос о значимости вклада внутренней энергии нашей планеты в тепловой баланс земной поверхности. Сообщается, что поток тепла, поступившего к земной поверхности при подъёме подземных флюидов по разломам земной коры в бореальной зоне Европейской части России, достигает десятков ватт на квадратный метр. Была выявлена корреляция между пространственным распределением в бореальной зоне локальных ареалов теплолюбивой растительности и аномалиями конвективного теплового потока [13].

Известно, что в области сезонного промерзания почв часть поглощённой солнечной радиации расходуется на компенсацию криогенного фактора. Из-за присутствия теплового поля, образованного за счёт тепла из недр, верхний слой почвы быстрее аккумулирует солнечное тепло [8]. Земное тепло активно действует на почвенно-геохимические и биологические процессы в почво-грунтах — разложение первичных и вторичных минералов, высвобождение биофильных элементов, важных для растений и микроорганизмов, трансформацию органического вещества, улучшение условий жизнедеятельности растений, микроорганизмов и другой биоты.

Тепловая энергия недр поступает в виде потока, который измеряется количеством тепла, выделяемого с единицы площади за единицу времени. Тепловой поток из внутренних частей Земли обладает значительной изменчивостью в зависимости от геологического строения территории, расположения разломов в земной коре и т.д. Например, 20-разрядная шкала потоков эндогенного тепла для Европы колеблется от 1–10 до 190–679 мВт/м². На территории Франции основная масса данных находится в пределах 111–120 мВт/м². Восточно-Европейская платформа (Русская платформа) имеет среднее значение теплового потока 46 мВт/м² [14].

В различных широтах влияние тепла недр на продукционные процессы растительных сообществ существенно различается. В бореальных широтах в районах с сезонно промерзающими почвами в ранне-весенний период эндогенное земное тепло оказывает значительное положительное влияние на наземные экосистемы. Особенно велика роль земного тепла в период отрицательных и низких положительных температур, когда существует градиент между глубокими слоями грунтов и поверхностью почвы и тепло Земли движется вверх. В этом случае земное тепло ограничивает проникновение холода вглубь почвенного профиля. В тёплый весенний период протаивание почв происходит и снизу. Далее расход солнечной энергии на нагревание почвы и под-

стилающих пород осуществляется в области положительных температур, создавая тем самым благоприятные экологические условия для развития и жизнедеятельности биоты.

При снежном покрове солнечная радиация не достигает поверхности почвы и фактически не оказывает воздействия на скорость почвенных процессов. При высоком снежном покрове в районах сезонно промерзаемых почв температура верхних слоёв зимой иногда достигает положительных величин за счёт земного тепла, что способствует активному протеканию почвенных процессов и в дальнейшем увеличению биологической продуктивности экосистем. Недавние исследования показали [13], что разница в тепловом поле Земли в летнее время в северных регионах существенно увеличивает продуктивность лесов.

Насколько велико это воздействие в количественном выражении? Например, исследования в Архангельской области [15] свидетельствуют, что в зависимости от геологического строения территории в лесных биогеоценозах различие средних значений температуры почвы пробных площадок на глубине 30 см летом составляет 1–1,5°C. На участке с повышенным значением температуры почвы в лесной подстилке обнаруживается больше органического вещества, выше показатель гумификации и больше подвижного фосфора, а также обменного кальция. Более высокий температурный фон способствует увеличению микробиологической активности, скорости минерализации органического вещества и, как следствие, уменьшению общей мощности органогенных горизонтов. Таким образом, приход земного тепла является важным фактором в функционировании наземных экосистем, и его величину следует рассматривать в качестве важного входящего потока энергии.

Наши расчёты показали, что на Русской платформе при среднем значении теплового потока в 46 мВт/м² на 1 га земной поверхности из недр Земли за год поступает около 14500 МДж энергии земного тепла, что эквивалентно выделению тепла при разложении около 7 ц растительного органического вещества.

Принимая во внимание критерий качества энергии, мы рассчитали структуру входящих потоков энергии Солнца и разных видов органического вещества для типичных сельскохозяйственных культур, возделываемых на серых лесных почвах в южном Подмоскowie при различной интенсивности удобрения. В полевых исследованиях использовался следующий пятипольный севооборот: озимая пшеница, кукуруза на силос, ячмень с подсевом клевера, клевер 1-го года пользования, клевер 2-го года пользования. Агрохимическая характеристика почв, условия и методика проведения полевых опытов описаны ранее [9]. Расчёт влияния минеральных удобрений на

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

Культура	Минеральные удобрения, действующее вещество урожай, ц/га	Суммарная солнечная радиация за период вегетации культуры, МДж/га	Пожнивные и корневые остатки, эксудаты и корнепад предшественника, т/га	Окисленный гумус почвы, т/га	Семена, ц/га	Техническая энергия, МДж/га
Озимая пшеница, зерно*, солома**	<u>без удобрений</u> 33.1*; 32.3**	2096 × 10 ⁴	12.16	2.56	2.5	10896
	<u>N40P40K40</u> 38.1*; 42.2**	2096 × 10 ⁴	12.64	2.72	2.5	17541
	<u>N135P150K110</u> 41*; 52.1**	2096 × 10 ⁴	12.45	3.10	2.5	32287
Кукуруза на силос, скошенная биомасса	<u>без удобрений</u> 384	1868 × 10 ⁴	3.96	2.96	0.5	4974
	<u>N90P60K40</u> 516	1868 × 10 ⁴	4.51	3.32	0.5	16571
	<u>N150P190K190</u> 630	1868 × 10 ⁴	4.54	3.56	0.5	28595
Ячмень с подсевом клевера	<u>без удобрений</u> 16.5*; 19.1**	1760 × 10 ⁴	2.46	1.26	2.5	5389
	<u>N60P40K40</u> 32.3*; 33.4**	1760 × 10 ⁴	2.87	1.50	2.5	14046
	<u>N140P140K80</u> 38.3*; 36**	1760 × 10 ⁴	3.03	1.82	2.5	25713
Клевер 1-го и 2-го годов пользования (на сено)	<u>без удобрений</u> 135	3469 × 10 ⁴	3.67	1.57	0.1	7308
	<u>P80 + 40 K80 + 40</u> 152	3469 × 10 ⁴	4.13	1.63	0.1	13477
	<u>P160 + 80 K200 + 100</u> 151	3469 × 10 ⁴	4.80	1.70	0.1	20330

*Зерно – при 14% влажности, ** солома и сено – при 20% влажности.

потери гумуса почвы проводился с учётом поправочных коэффициентов [16]. Величину биомассы пожнивных и корневых остатков культурных растений определяли экспериментальным путём. Прижизненные выделения органических веществ растениями в почву и корнепад оцениваются в среднем в 1/3 от суммарной продуктивности фотосинтеза [17]. В таблице 2 приведены данные о поступлении различных видов энергоносителей в экспериментальные агроэкосистемы.

Следует отметить, что при анализе потоков энергии в агроэкосистеме необходимо принимать во внимание поступление пожнивных и корневых остатков предшествующей культуры, так как эффективное влияние органических остатков на биогеохимические и биологические процессы в почве происходит фактически только на следующий год. Разложение органики начинается после

уборки урожая и поступления органических остатков в почву после вспашки. Полное разложение растительных остатков в почве происходит в течение 1.3 года [18]. Этим последствием органики и объясняется влияние предшественника на почвенные процессы и урожай культур в севообороте.

Наши исследования показали, что большие затраты технической энергии в посевах озимой пшеницы связаны с проведением технологических операций по уборке соломы на поле: подбор и прессовании соломы, подбор тюков, перевозка и складирование тюков на краю поля. Расчёты, проведённые по общепринятой методике, свидетельствуют, что в посевах озимой пшеницы, например, при внесении минеральных удобрений в дозе N40P40K40 без учёта качества энергии солнечная радиация составляет 99.5% суммарного

Таблица 3. Поступление энергии в агроэкосистемы на серых лесных почвах с учётом качества энергии (среднее за 5 лет)

Культура	Минеральные удобрения, действующее вещество урожай, ц/га	Суммарная солнечная радиация за период вегетации культуры	Пожнивные и корневые остатки, эксудаты и корнепад предшественника	Окисленный гумус почвы	Семена	Техническая энергия	Всего
Озимая пшеница, зерно*; солома**	<u>без удобрений</u> 33.1*; 32.3**	<u>2096</u> 43.7	<u>254.1</u> 5.3	<u>214</u> 4.5	<u>52</u> 1.1	<u>2179</u> 45.4	<u>4795</u> 100
	<u>N40P40K40</u> 38.1*; 42.2**	<u>2096</u> 34.1	<u>264.2</u> 4.3	<u>227.4</u> 3.7	<u>52</u> 0.8	<u>3508</u> 57.1	<u>6148</u> 100
	<u>N135P150K110</u> 41*; 52.1**	<u>2096</u> 23	<u>260.2</u> 2.9	<u>259.2</u> 2.8	<u>52</u> 0.6	<u>6457</u> 70.7	<u>9124</u> 100
Кукуруза на силос, скошенная биомасса	<u>без удобрений</u> 384	<u>1868</u> 58.3	<u>82.8</u> 2.6	<u>247.5</u> 7.7	<u>10</u> 0.3	<u>995</u> 31.1	<u>3203</u> 100
	<u>N90P60K40</u> 516	<u>1868</u> 33.6	<u>94.3</u> 1.7	<u>277.6</u> 5	<u>10</u> 0.2	<u>3314</u> 59.5	<u>5564</u> 100
	<u>N150P190K190</u> 630	<u>1868</u> 23.4	<u>94.9</u> 1.2	<u>297.6</u> 3.7	<u>10</u> 0.1	<u>5719</u> 71.6	<u>7990</u> 100
Ячмень с подсевом клевера	<u>без удобрений</u> 16.5*; 19.1**	<u>1760</u> 57.7	<u>51.4</u> 1.7	<u>105.3</u> 3.5	<u>52</u> 1.7	<u>1078</u> 35.4	<u>3047</u> 100
	<u>N60P40K40</u> 32.3*; 33.4**	<u>1760</u> 36.6	<u>60</u> 1.3	<u>125.4</u> 2.6	<u>52</u> 1.1	<u>2809</u> 58.4	<u>4806</u> 100
	<u>N140P140K80</u> 38.3*; 36**	<u>1760</u> 24.6	<u>63.3</u> 0.9	<u>151.4</u> 2.1	<u>52</u> 0.7	<u>5143</u> 71.7	<u>7170</u> 100
Клевер 1-го и 2-го годов пользования (на сено)	<u>без удобрений</u> 135**	<u>3469</u> 67.5	<u>76.7</u> 1.5	<u>131.3</u> 2.6	<u>2</u> 0.04	<u>1462</u> 28.4	<u>5141</u> 100
	<u>P80 + 40 K80 + 40</u> 152**	<u>3469</u> 54.3	<u>86.3</u> 1.4	<u>136.3</u> 2.1	<u>2</u> 0.03	<u>2695</u> 42.2	<u>6389</u> 100
	<u>P160 + 80 K200 + 100</u> 151**	<u>3469</u> 44.6	<u>100.3</u> 1.3	<u>142.1</u> 1.8	<u>2</u> 0.03	<u>4066</u> 52.3	<u>7779</u> 100

* Зерно – при 14% влажности, ** солома и сено – при 20% влажности.

энергетического потока. Анализ структуры потоков энергии с учётом её качества даёт иную картину (табл. 3). Величина вложений антропогенной энергии непосредственно на поле с озимой пшеницей в варианте N40P40K40 оценивается в $3508 \cdot 10^4$ МДж/га. Солнечная радиация за период вегетации культуры составляет 34.1% суммарного входящего энергетического потока, 4.3% приходится на энергию растительного органического вещества пожнивных и корневых остатков многолетних трав (предшественников озимой пшеницы), 3.7% – на энергию разложившегося гумуса и 57.1% – антропогенную энергию. В посевах кукурузы в варианте N90P60K40 солнечная радиация составляет 33.6% суммарного энергетического

потока, пожнивные и корневые остатки предшественника – 1.7%, энергия окисленного почвенного гумуса – 5.0%, антропогенная энергия – 59.5%.

Таким образом, величины потоков антропогенной энергии на поле экспериментальных агроэкосистем, рассчитанные с учётом качества энергии, сопоставимы с величиной входящей солнечной радиации 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 является воспроизводство

почвенного плодородия – компенсация эрозионных потерь гумуса и питательных веществ, восстановление содержания разложившегося гумуса, затраты на нейтрализацию кислотности, вызванной внесением минеральных удобрений в почву и т.д. Так, на воспроизводство параметров плодородия после возделывания озимой пшеницы при варианте N40P40K40 необходим поток антропогенной энергии в размере 3867 МДж/га или $773.4 \cdot 10^4$ МДж/га в солнечном эквиваленте. Совокупные затраты технической энергии на посев и выращивание, уборку, транспортировку и доработку продукции, восстановление почвенного плодородия при производстве 38.1 ц/га зерна и 42.2 ц/га соломы составляют 31317 МДж/га, или $6263 \cdot 10^4$ МДж/га в солнечном эквиваленте.

Итак, расчёт потока антропогенной энергии с общебиосферных позиций показывает, что он по величине, а тем более по роли, которую играет в создании и поддержании агроэкосистем, соизмерим с приходящей солнечной радиацией. Для посевов солнечная и антропогенная энергия равнозначны и необходимы, а существование культурных фитоценозов в полевых условиях невозможно в отсутствии каждой из них.

Существенное влияние на получение ландшафтами энергии оказывает тепло земных недр, которое поступает равномерно в течение всего года. Количество энергии земного тепла, достигающего поверхности почвы, значительно различается в зависимости от геологического строения территории. В Московской области, расположенной на Русской платформе, из недр за год в ландшафты поступает около 14500 МДж на 1 га. Эта величина сопоставима с затратами технической энергии в типичных агроэкосистемах на серых лесных почвах (см. табл. 2), поэтому учёт поступления тепла из недр – необходимое условие объективной оценки входящего совокупного энергетического потока в агроэкосистемы и ландшафты в различных регионах мира.

Важным вопросом в земледелии является сохранение плодородия почв. Продуктивность агроэкосистем во многом определяется содержанием гумуса. Одним из путей поддержания плодородия стало предотвращение смыва почв и потерь органических веществ и энергии с эрозионным материалом и жидким стоком с аграрных территорий.

Для оценки баланса энергии в ландшафтах, том числе и агроландшафтах, необходимы методические разработки и изучение входящих и выходящих потоков энергии различных видов органического вещества. В качестве примера в таблице 4 приведён один из результатов исследований потоков энергии в модельном лесо-аграрном ландшафте в южном Подмоскovie. Экспериментальный ландшафт представляет собой водосбор

малой реки, площадь его до створа наблюдений равна 19 км², из которых на долю интенсивно удобряемой пашни приходится 8 км², леса – 7 км². Остальные 4 км² находятся под дорогами, гидрографической сетью, пустошами, постройками, балками, оврагами и т.д. На территории возделывались следующие полевые культуры: озимая пшеница (300.5 га), ячмень (143.9 га), кукуруза на силос (97.1 га), картофель (112 га), многолетние травы 1-го года пользования (102.5 га). Под кукурузу в анализируемом году было внесено 3 тыс. т навоза. Расчёты показали, что с органическим веществом семян этих культур приход энергии составил 3861 ГДж в год. После уборки урожая культур с корневыми и пожнивными остатками в почву поступило 22844 ГДж энергии, или 2839 ГДж на 100 га пашни. Суммарный входящий поток энергии органического вещества составил 40305 ГДж на всю площадь бассейна, или 5039 ГДж на 100 га пашни. Исходя из размеров посевных площадей культур, их продуктивности, мы оценили вынос энергии с урожаями культурных растений (см. табл. 4).

С урожаями основной и побочной продукции из ландшафта отчуждено 45684 ГДж энергии, или 5711 ГДж в расчёте на 100 га пашни. Таким образом, в экспериментальный бассейн за год поступило энергии органического вещества несколько меньше, чем вынесено её с товарной и побочной продукцией культурных растений. Выходящие потоки энергии из ландшафта за счёт различных видов эрозионных процессов составили очень большую величину. При анализе потерь необходимо учитывать количество энергии определённого энергоносителя, затраченного на получение другого энергоносителя. Действительно, при расчёте потерь энергии из ландшафта, исходя из простого суммирования выноса энергии массой гумусовых веществ твёрдого стока, стока водорастворимых органических веществ, гумуса почвы, отчуждаемого при уборке картофеля (технологическая эрозия), а также уменьшения содержания гумуса в почвах агроэкосистем за счёт внутрипочвенных процессов окисления, общая величина потерь энергии составит 38895 ГДж.

Простое сравнение входящих потоков энергии органического вещества (п. 6¹ – 5039 ГДж на 100 га пашни) и непродуктивных выходящих потоков энергии (п. 7 – 3895 ГДж) (см. табл. 4) может привести к ошибочному выводу о преобладании поступления энергии в почвы над потерями. Однако известно, что коэффициент гумификации в почве органического вещества – навоза, пожнивных и корневых остатков – не превышает 25%. На образование 1 т гумусовых веществ требуется около 4 т растительного органического вещества. Если принять во внимание качество входящей и выходящей энергии, обнаружится отрицательная на-

Таблица 4. Основные потоки энергии (ГДж) в бассейне р. Любожихи

Потоки	Показатели	На всю площадь бассейна (1900 га)	На 100 га	
			площади бассейна	пашни бассейна
Входящие потоки				
1 ¹	Суммарная солнечная радиация за год, в том числе ФАР за период >5°C	72048 × 10 ³ 28311 × 10 ³	3792 × 10 ³ 1490 × 10 ³	3792 × 10 ³ 1490 × 10 ³
2 ¹	Органические удобрения	11998	631	1500
3 ¹	Семена сельскохозяйственных культур	3861	203	483
4 ¹	Органические вещества, вымытые атмосферными осадками из полога зерновых культур	1602	84.3	200
5 ¹	Корневые и пожнивные остатки сельскохозяйственных культур	22844	1203	2856
6 ¹	Итого (сумма потоков 2 ¹ –5 ¹)	40305	2121	5039
Выходящие потоки				
1	Отчуждение с продукцией агроэкосистем	45684	2404	5711
2	Вынос с лесными грибами	14.6	0.77	—
3	Потери с гумусовыми веществами твёрдого стока реки	348	18.3	43.5
	Потери с гумусовыми веществами твёрдого стока реки с учётом 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
	Вынос с гумусом при технологической эрозии с учётом качества энергии	1280	67.4	160
6	Потери гумуса пашни при внутрипочвенном окислении	29632	—	3704
	Потери гумуса пашни при внутрипочвенном окислении с учётом качества энергии	118528	—	14816
7	Итого (сумма потоков 3–6)	38895	487.1	3895
	Итого (сумма потоков 3–6 с учётом качества энергии)	122060	593.3	15257.5

правленность энергетических потоков в ландшафте (см. табл. 4). Суммарные потери энергии из агроландшафта с учётом её качества оцениваются в 122.1 тыс. ГДж, или в 3 раза больше, чем поступило энергии в почву с органическими удобрениями, пожнивными и корневыми остатками и семенами сельскохозяйственных культур. В итоге происходит истощение запасов энергии в почвах агроэкосистем, что приводит к нарушению круговорота питательных веществ, снижению биологической и геохимической активности почв.

Исследование потоков энергии в агроэкосистемах и агроландшафтах с учётом качества этой энергии даёт реальную картину величины и направленности энергетических процессов, происходящих на аграрной территории. Разработанная модель показывает структуру потоков энергии в солнечном эквиваленте и позволяет объективно оценить величину поступающей в агроэкосистемы энергии. Солнечная радиация во входящем энергетическом потоке при средней удобренно-

сти экспериментальных агроэкосистем составляет по озимой пшенице 40.4%, кукурузе на силос 33.8%. Доля технической энергии от суммарного поступления энергетических ресурсов достигает 53.3% для озимой пшеницы и 60% — для кукурузы.

Пример модельного агроландшафта показал, что применение нового методического подхода к анализу входящих и выходящих потоков энергии органического вещества выявил резкий дефицит энергии, который необходимо сократить благодаря внесению в почвы органики в различной форме и уменьшению потерь за счёт внутрипочвенных процессов окисления гумуса и водозерононного выноса. Эффективным способом пополнения органического вещества в составе почв является посев сидератов. Это более экономный по затратам технической энергии приём по сравнению с внесением навоза [7].

Предполагается, 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, широкого вовлечения в интенсификационные процессы всех биологических компонентов (почвенной микрофлоры, орнито- и энтомофауны и др.), более дифференцированного использования адаптивного потенциала культурных видов и сортов растений [3].

Однако “конструирование” посевов требует и дополнительных затрат антропогенной энергии. “Конструирование” в целом – это антропогенное управление агроэкосистемой. Задача человека состоит в том, чтобы энергетическая и экономическая эффективность приёмов интенсификации как за счёт техногенных факторов, так и за счёт биологизации и экологизации производства в агроосфере повышалась. В противном случае всё “конструирование” будет нецелесообразным. В связи с этим необходима закладка небольших поливариантных натуральных моделей посевов в различных почвенно-климатических зонах, созданных по упомянутым выше принципам, проведение энергетического и экономического анализа полученных результатов и построение и использование наиболее эффективных структур агроландшафтов.

Растительный покров не может использовать солнечную радиацию полностью как в силу полихроматического спектрального состава света, так и в силу свойств поглотительной способности зелёного листа. Однако с помощью конструирования посевов (многовидовой состав культурных фитоценозов, подбор сортов, оптимизация системы удобрений, повышение плодородия почв, адаптивное размещение агроэкосистем и т.д.) можно увеличить КПД фотосинтетически активной радиации. С другой стороны, поступление солнечной энергии на территорию ограничивается её географическим положением. В этом смысле ресурс солнечной энергии является ограниченным. Задача человека – стремиться с помощью конструирования агроэкосистем к повышению КПД фотосинтетической активной радиации до максимально возможного, но экономически и энергетически целесообразного для каждой конкретной сельскохозяйственной территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Снакин В.В., Хрисанов В.Р., Мельченко В.Е.* Устойчивость природных территориальных комплексов – базовая компонента устойчивого развития страны //
2. *Череменский Г.А.* Геотермия. Л.: Недра, 1972.
3. *Жученко А.А.* Адаптивное растениеводство (эколого-энергетические основы): теория и практика. Т. 1. М.: Агрорус, 2008.
4. *Булаткин Г.А.* Методические основы анализа потоков энергии в агроэкосистемах и агроландшафтах // Ресурсосберегающее земледелие на рубеже XXI века. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. М.: Рос. гос. аграр. заоч. ун-т., 2009.
5. *Иванов К.П.* Энергетические проблемы жизни // Вестник РАН. 2010. № 8.
6. *Булаткин Г.А., Ларионов В.В.* Основы энергетической концепции агротехногенной нагрузки. Препринт. Пушкино: ОНТИ НЦБИ РАН, 1992.
7. *Волбуев В.Г.* Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974.
8. *Худяков О.И.* Почвы лесостепи Внутренней Азии. М.: Ин-т проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 2009.
9. *Булаткин Г.А.* Эколого-энергетические основы воспроизводства плодородия почв и повышения продуктивности агроэкосистем. М.: НИА-Природа, 2008.
10. *Лыков А.М.* К методике расчётного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии // Известия ТСХА. Вып. 6. 1979.
11. Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1978.
12. *Павлов А.В.* Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Книжн. изд-во, 1975.
13. *Горный В.И., Теплякова Т.Е.* О влиянии эндогенного тепла Земли на формирование в бореальной зоне локальных ареалов неморальной растительности // Доклады АН. 2001. № 5.
14. *Короновский Н.В.* Общая геология. М.: КДУ, 2006.
15. *Дровнина С.И.* Влияние конвективного теплового потока Земли на лесные экосистемы Европейского Севера России (на примере Архангельской области). Автореф. диссертации на соискание учёной степени канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2007.
16. *Кудяров В.Н.* Интенсивность процессов азотного цикла в почве при применении азотных удобрений // Известия АН СССР. Сер. биологическая. 1982. № 5.
17. *Умаров М.М.* Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986.
18. *Титлянова А.А., Тихомирова Н.А., Шатохина Н.Г.* Продукционный процесс в агроценозах. Новосибирск: Наука, 1982.