

## ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ)

Проведен эколого-энергетический анализ трех способов восстановления сосны на вырубках: посадкой сеянцев, посевом семян и естественным зарастанием. В анализе, наряду с техногенными вкладами энергии, учтены природные; показана их доля в процессе восстановления лесов, предложены пути экономии энергии, раскрыта структура участвующих в процессе энергетических потоков.

**Ключевые слова:** эколого-энергетическая эффективность; лесовосстановление; энергетические эквиваленты.

В последние десятилетия работы многих ученых посвящаются поиску оптимальных взаимоотношений между человеческими запросами и возможностями природы удовлетворить эти запросы. Энергопотребление общества растет вместе с нагрузкой на природные системы, в то же время ресурсы продаются по низким ценам, в которые не закладывается труд самой природы по их производству – природная рента. Отсюда истощение, деградация природной среды, нехватка денег на ее восстановление. Для ликвидации этого перекоса очень важно правильно оценить вклады природы и людей в производство энергоресурсов и материальных благ. Поиск универсальной единицы измерения этих вкладов занимались многие ученые и пришли к выводу, что таковой должна стать энергия. Появились энергетические методики: теория оценки Сраффа, воплощенной энергии Паттерсона, оценка состояния системы через эксергию и др. Энергетический анализ привлекает ученых идеей адекватного сравнения не сравнимого с помощью других мер: денег, килограммов, метров. Он обеспечивает возможность не только сравнивать вклады природы с вкладами человека в какой-либо товар, но и определять энергетические потоки в различных системах (агро-, эко-, урбосистемах и др.), сравнивать их по эффективности использования ресурсов. С помощью энергетического анализа можно эффективно оценивать различные варианты новых технологий, устойчивость функционирования любых систем (биологических, экономических, социальных и пр.). Это отличный инструмент системного анализа. Однако на настоящий момент он рассматривается как дополнительное средство к основному – экономическому или экологическому исследованию. Причина этого – недостаточность разработанности энергетического анализа.

Между тем еще в XIX в. по теории Д. Джоуля и Д. Мэйера энергия представлялась всеобщей универсальной единицей, хотя она понималась как эквивалент тепла. Важный вклад внес А. Лотка, который развил теорию максимизации энергии, биохимической динамики и экологии популяций, а также наш соотечественник С.А. Подолинский, занимавшийся исследованием теории превратимой энергии, выявлением значения растений, животных и человека в ее распределении, роли труда в повышении энергетического бюджета на Земле. Ближе всех к решению проблемы подошел эколог Говард Одум, заложив основы теории овеществленной в продукте энергии, назвав ее эмергией.

Сегодня анализ эколого-экономических систем на основе энергетических расчетов используется в области инженерной экологии [1], экологии территорий [2], лесопромышленного менеджмента [3], экономики

стран и регионов [4, 5], экономической теории стоимости [6] в системе сельского хозяйства [7]. В нашей стране энергетический анализ используется в области сельского хозяйства такими учеными, как А.С. Миндрин, Г.А. Булаткин, Г.И. Чогут, О.В. Фельдман, Е.А. Денисенко, Д.О. Логофет, В.А. Бузько, А.В. Глотко и др. Ими разработаны методики, определены некоторые энергетические эквиваленты для российских условий, рассчитана эффективность технологий сельскохозяйственного производства [8–12].

В большинстве работ, как правило, все потоки переведены в стандартные энергетические единицы, но без учета того, что различные виды энергии неэквивалентны. Использование стандартных энергетических единиц не позволяет учитывать вклад возобновляемых природных ресурсов, таких как солнечная радиация, а между тем потоки природной энергии имеют значение на порядок больше искусственной.

В Томске, в лаборатории самоорганизации геосистем ИМКЭС СО РАН, группа ученых во главе с проф. А.В. Поздняковым обратилась к данной проблеме в конце 1990-х гг. [13]. Разработаны новые подходы и методологические основы оценки функционирования различных геосистем в энергетических единицах. Проведен энергетический анализ функционирования конкретных геосистем на примере агроэкосистем [14] и лесных систем [15].

В данном исследовании применен эколого-энергетический анализ к лесовосстановительным работам как наиболее важной и трудоемкой стадии создания леса. Объектом исследования взяты леса Тимирязевского лесхоза Томской области.

Общая площадь лесов Томской области составляет 91% от ее территории, ведется интенсивная лесохозяйственная деятельность, имеющая тенденцию к росту. Так, согласно Лесному плану Томской области, к 2018 г. объемы заготовки древесины составят 11,4 млн м<sup>3</sup> в год, т.е. должны увеличиться в 3,2 раза по сравнению с 2007 г. [16. Кн. 2. С. 9]. В связи с вышеизложенным актуальность изучения лесных экосистем, ликвидации последствий экономической деятельности путем восстановления лесов не ослабевает. Лесоводы отмечают большую значимость лесовосстановления по сравнению с лесопользованием и отстаивают особую важность принципа постоянства и неистощительности пользования лесными богатствами.

### Методика исследований

Основная задача энергетического анализа – оценка затрат различных видов энергии. В основу исследования нами взята уже апробированная на сельскохозяйст-

венном производстве методика энергетического анализа [8], но для полноты картины были учтены не только техногенные вклады энергии, но и природные, поэтому представленный анализ мы обозначили как эколого-энергетический. К природным источникам относятся солнечное излучение, осадки и почва, к техногенным источникам – привнесенные человеком в рассматриваемую экосистему для поддержания ее структуры, функционирования и снижения неблагоприятных воздействий на растущий лес. Все энергетические вклады подразделяют на прямые (непосредственно связанные с работами на данном участке леса) и косвенные. В случае искусственного лесовосстановления к прямым вкладам относятся затраты труда, расход топлива и смазочных материалов. При учете природной составляющей сюда добавляются солнечная энергия, химическая энергия осадков и энергия питательных веществ почвы. К косвенным вкладам относятся затраты энергии на создание и ремонт техники, на производство посевного материала (семян, сеянцев). Электроэнергия и удобрения не используются в данной технологии. При исчислении энергетических затрат используются энергетические эквиваленты и нормы амортизации на лесохозяйственные машины, орудия, тракторы. Энергетические эквиваленты техники включают в себя расход энергоносителей на изготовление металла для деталей тракторов и сельскохозяйственных машин, заменяемых при эксплуатационных ремонтах, энергию, потребленную на ректификацию кислорода, использованного при сварочных работах.

Суммарное количество затрат техногенной энергии рекомендуется находить по формуле

$$E = \sum_{i=1}^M (\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} L_i) = \sum_{i=1}^M E_i,$$

где  $M$  – число технологических операций;  $N_i$  – число видов энергозатрат в пределах каждой технологической операции;  $x_{ij}$  – затраты в натуральном выражении  $j$ -го вида затрат при выполнении  $i$ -й операции;  $L_j$  – энергетический эквивалент  $j$ -го вида затрат;  $E_i$  – энергозатраты при выполнении  $i$ -й технологической операции [11].

В качестве конечного показателя энергетической эффективности восстановления леса выступает коэффициент энергетической эффективности  $K_{ee}$ , численное значение которого равно отношению энергосодержания продукции  $E_n$  к энергетическим затратам на производство  $E$ :

$$K_{ee} = E_n / E.$$

Для раскрытия значения природных потоков и сравнения их с техногенными вкладами мы применили методику Г. Одума [17]. По данной методике все энергетические потоки приводятся к потоку солнечной энергии через трансформации. Трансформация показывает, сколько джоулей солнечной энергии пошло на получение 1 джоуля приводимой энергии. Например, по данным Фельдмана, Денисенко, Логофета, на получение 1 джоуля химической энергии дождя в условиях средней полосы России затрачивается 18199 солнечных джоулей (сДж). Трансформации в наши расчеты взяты из нескольких источников [7, 10, 17], они имеют размерность сДж/Дж или сДж/кг. Трансформация семян

сосны рассчитана автором для климатических условий юга Томской области.

Методика позволяет анализировать технологии лесовосстановления, применяемые в конкретных лесорастительных условиях. Необходимо также принимать во внимание, что при оценке энергетической эффективности систем корректно сравнивать только технологии возделывания одной и той же культуры, различные сорта конкретной культуры, а также агроценозы, возделываемые с одинаковой целью (например, культуры, выращиваемые для получения только сахара или производства только волокна, или культуры-источники грубых кормов) [9]. В данном исследовании мы анализируем эколого-энергетическую эффективность трех способов восстановления сосны обыкновенной: посадкой 2-летних сеянцев, посевом семян и естественным зарастанием. Так как во всех трех случаях  $E_n$  одинаковое, то выводы об эффективности сделаем на основе анализа затрат  $E$ .

### Расчет энергетических затрат на лесовосстановление

Лесовосстановление – это восстановление основных компонентов леса с возобновлением лесобразующих пород [18. Т. 1. С. 257]. Объектом исследования выбраны леса Тимирязевского лесхоза Томской области, расположенные в Обь-Томском лесохозяйственном районе южнотаежной лесохозяйственной подзоны. Климат территории является переходным от умеренно континентального Русской равнины к резкоконтинентальному Восточной Сибири. За год здесь в среднем выпадает 517 мм осадков [19]. Суммарная солнечная радиация 3800–4200 МДж/м<sup>2</sup> [20]. Общий объем элементов питания, потребляемых на создание годичной продукции (емкость биологического круговорота), оценивается по потреблению азота и зольных элементов (Si, Ca, K). Емкость биологического круговорота южной тайги составляет 470 кг/га в год [21]. По нашим расчетам, в первые 10 лет лесопосадки потребляют с питательными веществами почвы в среднем 11 016 МДж в год.

*Затраты техногенной энергии на искусственное лесовосстановление* 1 га леса в Тимирязевском лесхозе представлены в табл. 1 и 2. Расчет проводился согласно расчетно-технологическим картам по ОГУ Тимирязевский лесхоз. При расчетах лесовосстановления посадкой сеянцев в объем техногенной энергии включались затраты на производство 4,8 тыс. шт. двухлетних сеянцев сосны в питомнике, на подготовку площади, уборку порубочных остатков, подготовку почвы, посадку, агротехнические уходы, дополнение культур в размере 20% от посаженного количества. В табл. 2 включены затраты на производство семян сосны, посев, агротехнические уходы, дополнение культур. Сравнительная диаграмма затрат техногенной энергии на посев и посадку представлена на рис. 1.

При одинаковом потреблении энергии топлива и техники эти два способа существенно различаются по доле вкладываемого труда и затратам на посевной (посадочный) материал (см. рис. 1). Посадка более трудоемка за счет ручного труда, посев же производят меха-

низированно. С другой стороны, энергия в случае посадки культур экономится за счет выращивания посадочного материала в питомнике, тогда как при посеве тратится огромное количество семян. Семена будут «стоять» гораздо дороже, если учитывать затраты энергии на содержание лесосеменных плантаций и

сбор шишек с «живых» деревьев (в нашем расчете принималось, что сбор шишек осуществляется на вырубках с поваленных деревьев I класса бонитета, что экономичнее). Учтя эти особенности и механизированную посадку сеянцев, можно сделать восстановление культур более энергоэкономичным.

Т а б л и ц а 1

Техногенные энергетические затраты на создание 1 га культур сосны посадкой сеянцев

Наименование используемого ресурса	Единица измерения	Энергетический эквивалент, МДж/ед.	Затраты энергии	
			МДж	%
1. Техника	кг	142,2	760,7	8,1
2. Дизельное топливо	кг	37,66	1252,6	13,3
3. Моторные масла	кг	60,81	333,2	3,5
4. Бензин	кг	37,66	1755,3	18,7
5. Затраты труда	чел.-ч	43,4	4465,0	47,5
6. Сеянцы	тыс. шт.	175,6	842,9	9,0
<b>Итого</b>			<b>9409,7</b>	<b>100</b>

Т а б л и ц а 2

Техногенные энергетические затраты на создание 1 га культур сосны посевом семян

Наименование используемого ресурса	Единица измерения	Расход ресурса на га	Энергетический эквивалент, МДж/ед.изм.	Затраты энергии, МДж	
				Всего	%
1. Техника	м-ч	20,19	51,6	1041,9	12,7
2. Дизельное топливо	кг	77	37,66	2899,8	35,3
3. Затраты труда	чел.-ч	36,19	43,4	1570,6	19,1
4. Семена сосны	кг	1,08	2249,7	2429,6	29,5
5. Моторные масла	кг	4,62	60,81	280,9	3,4
<b>Итого</b>				<b>8222,8</b>	<b>100</b>

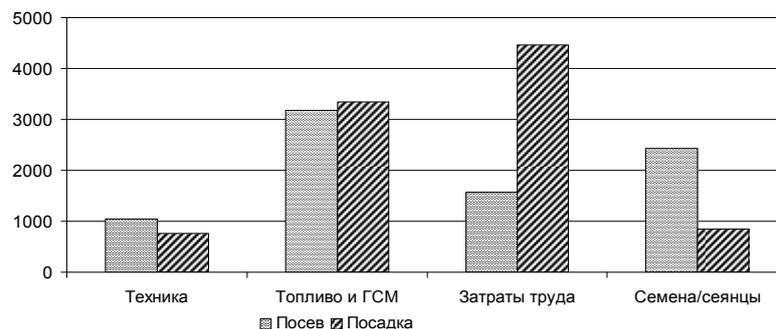


Рис. 1. Затраты техногенной энергии на выращивание 1 га культур сосны посевом семян и посадкой сеянцев

### Расчет энергетических затрат с учетом природных потоков

Естественное зарастание – способ лесовосстановления при котором не используется техногенная энергия и мы принимаем в расчет только природные потоки: солнечную радиацию, осадки, питательные вещества почвы, семена. Естественное лесовозобновление наблюдается на большей территории Томской области и проходит удовлетворительно. Вырубки возобновляются в течение 10 лет. За этот период времени используется следующая энергия: солнечная –  $42 \cdot 10^7$  МДж/га; энергия осадков – 255 400 МДж/га; энергия питательных веществ почвы – 110 159,7 МДж/га; энергия семян – 9 033 283,5 МДж/га. Выразив эти потоки в сол-

нечных джоулях, мы можем сравнить их между собой или, например, с другими способами лесовосстановления (см. табл. 3). Хотя значения трансформаций постоянно уточняются и значительно колеблются в зависимости от региона (трансформации природных потоков) и технологии добычи и производства (например, трансформации полезных ископаемых, машин), но доли участия человека и природы отображаются наглядно, как показано на рис. 2.

В производстве семян большей частью задействована природа, но привносит на необходимые площади и высевает семена высокого качества в процессе искусственного лесовосстановления все-таки человек, поэтому в этом случае энергию семян относим к техногенным потокам. В год посадки вклады энергии из техногенных

(экономических) и природных источников практически одинаковы (965 417 ГсДж и 995 767 ГсДж соответственно), но в последующие годы постоянны только вклады природы. Таким образом, 9/10 частей энергии в процесс

создания культур сосны посевом вкладывают природные источники, и лишь 1/10 идет из антропогенных источников. Этот расчет мы привели для наглядного соотношения природных и техногенных вложений.

Таблица 3

Структура использования природных и экономических ресурсов при создании 1 га культур сосны посевом семян

Наименование используемого ресурса	Единица измерения	Расход ресурса в год	Трансформация, сДж/ед.изм.	Затраты приведенной энергии, $\cdot 10^9$ сДж	Затраты за 10 лет, $\cdot 10^9$ сДж
<i>Природные ресурсы</i>					
1. Солнечная радиация	ГДж	42 000	1	42 000	420 000
2. Осадки	Дж	$25539,8 \cdot 10^6$	18199	464 798,8	4 647 988,2
3. Почва	Дж	$7761,4 \cdot 10^6$	63000	488 968,2	6 940 061,1
Всего природных ресурсов:				995 767	12 008 049,3
<i>Экономические ресурсы</i>					
4. Семена сосны	кг	0,9	$941281675,7 \cdot 10^6$	847 153,5	1 016 584,2
5. Затраты труда	МДж	40,38	1 700 000	68 646	123 046
6. Дизельное топливо и моторные масла	кг	81,62	6810 000 000	555,8	555,8
7. Техника	М-ч	20,19	$2,43 \cdot 10^{12}$	49 061,7	49 061,7
Всего экономических ресурсов:				965 417	1 189 247,7
Итого:				1 961 184	13 197 297

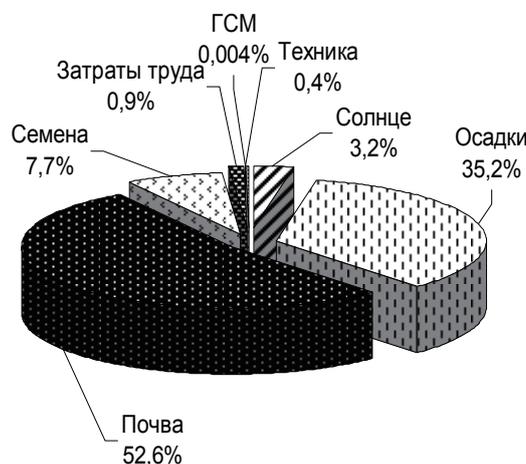


Рис. 2. Затраты природной и техногенной энергии на создание 1 га культур сосны посевом семян (за первые 10 лет)

Наименее энергозатратным способом, конечно, является естественное зарастание, т.к. в нем не участвуют техногенные потоки, но оно же является наименее надежным, т.к. зависит от погодных условий, урожая семян, технологических условий рубки и многого другого. В случае высокой конкуренции травяного покрова (например, во влажных чернично-долгомошниковых и травяно-болотных сосновых лесах) искусственное лесовосстановление является единственно возможным способом восстановления сосны без смены пород.

Таким образом, использование эколого-энергетического анализа позволило нам реально оценить энергетический вклад как природных, так и техногенных источников при восстановлении сосны обыкновенной, сравнить технологии лесовосстановления по эффективности, что свидетельствует о значительных перспективах описанного метода анализа, о возможностях его широкого применения в исследованиях функционирования различных геосистем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Odum H.P., Odum B. Concepts and methods of ecological engineering // Ecological Engineering. 2003. № 20. P. 339–361.
2. Адам А.М. Управление природопользованием на уровне субъекта Федерации. М.: Тиссо, 2002. 148 с.
3. Tilley D.R., Swank W.T. EMERGY-based environmental systems assessment of a multi-purpose temperate mixed-forest watershed of the southern Appalachian Mountains, USA // Journal of Environmental Management. 2003. № 69. P. 213–227.
4. Higgins J.B. Emergy analysis of the Oak Openings region // Ecological Engineering. 2003. № 21. P. 75–109.
5. Ortega E., Safonov P., Comar V. Emergy-based dynamic modeling of Brazil: conceptual considerations and scenarios for sustainable development // «Introduction to ecological engineering with brazilian case studies». Unicamp, SP, Brazil, 1998.

6. *Farber S.C., Costanza R., Wilson M.A.* Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services // *Ecological economics*. 2002. № 41. P. 375–392.
7. *Jiang M.M., Chen B., Zhou J.B. et al.* Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China // *Energy policy*. 2007. № 35. P. 4704–4719.
8. *Миндрин А.С.* Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции: Дис. ... докт. экон. наук. М., 1997. 291 с.
9. *Булаткин Г.А.* Эколого-энергетические основы воспроизводства плодородия почв и повышения продуктивности агроэкосистем: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2007. 44 с.
10. *Фельдман О.В., Денисенко Е.А., Логофет Д.О.* Энергетический подход при оценке эффективности использования ресурсов // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. М.: ВИНТИ, 1998. С. 66–81.
11. *Энергетический анализ* в сельском хозяйстве: Методологические и методические рекомендации. Кишинев, 1988. 128 с.
12. *Чогут Г.И.* Эффективность функционирования эколого-экономических систем в сельском хозяйстве: теория, методология, практика: Автореф. дис. ... докт. экон. наук. Воронеж, 2007. 43 с.
13. *Поздняков А.В.* Стратегия российских реформ. Томск, 1998. 324 с.
14. *Поздняков А.В., Шуркина К.А.* Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // *Вестник ТГУ*. 2008. № 316. С. 206–212.
15. *Иванова М.М.* Энергетический анализ экосистем как один из аспектов их многокритериальной оценки // *Проблемы устойчивого развития: иллюзии, реальность, прогноз: Материалы VI Всероссийского научного семинара «Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе»*. Томск: ТГУ, 2002. С. 143–147.
16. *Лесной план* Томской области (проект) // Департамент развития предпринимательства и реального сектора экономики ТО; ОАО «Лесинвест»; ИМКЭС СО РАН. Томск, 2008.
17. *Odum H.T.* Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making. N.Y.: John Wiley&Sons, Inc., 1996. 370 p.
18. *Данченко А.М., Данченко М.А.* Эколого-биологические термины в лесном хозяйстве: Словарь-справочник: В 3 т. Томск: Изд-во ТГУ, 2004.
19. *Косова Л.С.* Природа города Томска. Томск: Изд-во ТГУ, 1999. 115 с.
20. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К.* и др. Автоматический пост для контроля качества воздуха // *Труды Международной конференции ENVIROMIS'2000*. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2001. С. 15–20.
21. *Базилевич Н.И., Гребеничков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 15 апреля 2009 г.