



УДК 630\*232.49

## Моделирование динамики продукции энергии в лесных культурах ели

© Д.С. Бурцев

---

### **Dynamics of energy production modeling in spruce forest plants**

**D.S. Burtsev** (Saint-Petersburg Forestry Research Institute)

Results of research energy efficiency of spruce forest plants in shamrock growth conditions of south taiga Leningrad region are presented. Mathematical models of energy production dynamics in spruce forest plants and natural spruce-deciduous forest stands are constructed. Presence of current energy production two growth phases in during the period of supervision over investigated forest stands is proved and their time frameworks are defined.

**Key words:** energy, modeling, forest plants, spruce

### **Моделирование динамики продукции энергии в лесных культурах ели**

**Д.С. Бурцев**

Представлены результаты исследования энергетической эффективности лесных культур ели в кисличных лесорастительных условиях южной подзоны европейской тайги. Построены математические модели динамики продукции энергии в лесных культурах ели и естественных елово-лиственных древостоях. Доказано наличие двух фаз роста текущей продукции энергии в течение периода наблюдения за исследуемыми древостоями и определены их временные рамки.

**Ключевые слова:** энергия, моделирование, лесные культуры, ель

ФБУ «Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства»  
Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Институтский пр., д. 21  
Телефон: 8 (812) 552-80-21  
E-mail: forest1641@gmail.com

В настоящее время в лесном хозяйстве нет единого метода, позволяющего одновременно дать экологическую и экономическую оценку применяемым технологиям создания и выращивания лесных культур. Такие критерии как прибыль, рентабельность, себестоимость не отражают процессов функционирования экосистем и не дают представления о направленности их развития.

Вместе с тем в мировой практике сельского хозяйства в качестве универсального метода широкое распространение получила оценка потоков энергии. На ее основе можно проводить сравнение разнообразных технологий, оценивать структуру затрат антропогенной энергии по отдельным агротехническим приемам, разрабатывать научно обоснованные нормы допустимой антропогенной нагрузки.

С целью изучения динамики таксационных показателей древостоев и дальнейшего расчета параметров энергетической эффективности был обследован 91 участок лесных культур ели европейской I–III классов возраста. Сбор полевого материала проводился по общепринятым методикам. Для уточнения лесорастительных условий на каждом участке были определены видовой состав напочвенного покрова, тип подстилки, механический состав и степень увлажнения почвы, мощность генетических горизонтов. На отобранных для дальнейшего изучения участках лесных культур в кислых лесорастительных условиях были заложены 33 пробные площади. Полученные данные о запасах фитомассы переводились в энергетические единицы с помощью коэффициентов, представленных в литературных источниках [1, 3] — определялся запас энергии в фитомассе. Также устанавливались следующие параметры: текущая (среднепериодическая) продукция энергии — среднегодовое накопленное в древостое количество энергии за текущий год (период времени) на единице площади (ГДж/га); коэффициент полезного действия фотосинтетической активной радиации (КПД ФАР) — отношение энергии, аккумулированной в фитомассе древесины и побочной продукции на единице площади к приходу энергии ФАР на единицу площади за вегетационный период [4];

затраты антропогенной энергии — совокупные затраты энергии по каждой технологической операции при создании и выращивании лесных культур; коэффициент энергетической эффективности — отношение запаса энергии насаждения к затратам антропогенной энергии.

При моделировании динамики накопления энергии в древесине лесных культур определялся возраст, соответствующий пику накопления запаса энергии в древесине насаждения. Эта операция производилась путем сравнения двух линейных уравнений, построенных на основании данных об изменении исследуемого параметра с возрастом. Коэффициенты детерминации, показатели значимости для коэффициентов регрессионного уравнения и для регрессии в целом достоверны на 5 % уровне значимости.

В результате мы выяснили, что к концу третьего класса возраста культуры не достигают желаемого уровня продуктивности. К этому времени, как правило, формируется смешанное хвойно-лиственное насаждение, а ель часто занимает подчиненное положение во втором ярусе. КПД ФАР смешанного древостоя увеличивается с возрастом насаждения от 0,03 до 0,42 %, в том числе елового яруса — от 0,01 до 0,18 %, и максимального значения достигает в 51–60 лет (табл. 1). Это означает, что в течение 60 лет роста культур в древесине культивируемых деревьев аккумулировалось только 0,18 % солнечной энергии, поступившей в экосистему за весь этот период.

Очень низкий КПД наблюдается в возрасте до 20 лет, что говорит о слабом использовании солнечной энергии для формирования древесины на начальных этапах развития экосистемы. Однако со второго класса возраста уровень среднепериодического КПД ФАР начинает резко возрастать. Из этого можно сделать вывод о том, что для повышения производительности и ускорения продукции энергии необходимо интенсивно проводить лесокультурные и лесохозяйственные мероприятия в молодых культурах.

При невысоком значении КПД ФАР и низком уровне воздействия на искусственную экосистему в молодом возрасте — к 60 годам культуры имеют достаточно высокий коэффициент

Таблица 1

## Выровненные показатели энергетической эффективности лесных культур ели

Энергетические параметры насаждения	Интервал возраста, лет					
	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60
Доля ели в составе, ед.	4,0	5,5	5,8	5,6	5,4	5,2
Запас энергии в древесине, ГДж/га	$\frac{16}{7}$	$\frac{102}{56}$	$\frac{633}{436}$	$\frac{1132}{571}$	$\frac{1697}{795}$	$\frac{2544}{1107}$
Среднепериодическая продукция энергии, ГДж/га·год	$\frac{3,3}{1,5}$	$\frac{10,2}{5,6}$	$\frac{63,3}{43,6}$	$\frac{113,2}{57,1}$	$\frac{169,7}{79,5}$	$\frac{254,4}{110,7}$
КПД ФАР, %	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{0,06}{0,03}$	$\frac{0,23}{0,16}$	$\frac{0,29}{0,15}$	$\frac{0,34}{0,16}$	$\frac{0,42}{0,18}$
Среднепериодический КПД ФАР, %	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{0,09}{0,05}$	$\frac{0,57}{0,39}$	$\frac{1,02}{0,51}$	$\frac{1,53}{0,72}$	$\frac{2,29}{1,00}$
Коэффициент энергетической эффективности	0,4	2,9	22,4	29,3	40,8	56,8

Примечание. В числителе — весь древостой, в знаменателе — еловый ярус

энергетической эффективности — он составляет 56,8. Таким образом, к концу третьего класса возраста в древесине культур накопилось в почти в 57 раз больше энергии, чем было израсходовано на их создание и последующие агротехнические уходы, что говорит

о целесообразности затрат на искусственное лесовосстановление.

В естественных молодняках максимальный уровень КПД ФАР также достигается в 51–60 лет (табл. 2), но составляет меньшую величину — 0,37 % против 0,42 % в культурах.

Таблица 2

## Показатели энергетической эффективности естественных молодняков ели

Энергетические параметры насаждения	Интервал возраста, лет					
	1–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60
Доля ели в составе, ед.	4,7	5,1	5,4	5,8	6,0	6,2
Запас энергии в древесине, ГДж/га	$\frac{50}{32}$	$\frac{307}{143}$	$\frac{746}{372}$	$\frac{1247}{681}$	$\frac{1782}{1006}$	$\frac{2246}{1314}$
Среднепериодическая продукция энергии, ГДж/га·год	$\frac{10,0}{6,4}$	$\frac{30,7}{14,3}$	$\frac{74,6}{37,2}$	$\frac{124,7}{68,1}$	$\frac{178,2}{100,6}$	$\frac{224,6}{131,4}$
КПД ФАР, %	$\frac{0,09}{0,06}$	$\frac{0,18}{0,09}$	$\frac{0,27}{0,13}$	$\frac{0,32}{0,18}$	$\frac{0,36}{0,20}$	$\frac{0,37}{0,22}$
Среднепериодический КПД ФАР, %	$\frac{0,09}{0,06}$	$\frac{0,28}{0,13}$	$\frac{0,67}{0,3}$	$\frac{1,12}{0,61}$	$\frac{1,60}{0,91}$	$\frac{2,02}{1,18}$

Примечания. 1) Расчеты проведены по данным В.С. Моисеева [2]. 2) В числителе — данные по всему древостою, в знаменателе — по еловому ярусу

Однако уровень усвоения энергии в еловом ярусе (0,22 %) в естественных молодняках более высокий, чем в культурах (0,18 %). В течение первого класса возраста в естественных елово-лиственных молодняках уровень усвоения ФАР втрое выше, чем в культурах — 0,09–0,18 %, что связано с большей густотой ели в начальные периоды формирования естественного насаждения.

В целом за 60-летний период в древесине стволов ели естественных елово-лиственных насаждений аккумулируется больше энергии (1314 ГДж/га), чем в лесных культурах (1107 ГДж/га). Общий запас энергии в древесине (2544 ГДж/га) напротив — выше в культурах, чем в древостоях естественного происхождения

(2246 ГДж/га). По-видимому, в искусственных насаждениях создаются более благоприятные условия для роста лиственных пород, чем в естественных. В связи с этим лиственный ярус лучше развит и получает большее количество ресурсов, в том числе и солнечной энергии.

В результате моделирования продукции энергии в древесине лесных культур и естественных елово-лиственных насаждений были получены регрессионные уравнения, отражающие особенности среднепериодической продукции энергии, и выделены возрастные периоды в развитии насаждений, различающиеся по скорости накопления энергии в древесине стволов деревьев (табл. 3).

Таблица 3

Регрессионные уравнения продукции энергии в древесине в разные периоды роста лесных культур ели

Возрастной период, лет	Регрессионное уравнение	Коэффициент детерминации
<i>Лесные культуры</i>		
<i>Весь древостой</i>		
1–26	$\ln(E) = 1,828 \cdot A + 0,9623$	$R^2 = 0,9984$
26–55	$\ln(E) = 0,405 \cdot A + 5,4083$	$R^2 = 0,9089$
<i>Еловый ярус</i>		
1–25	$\ln(E) = 2,042 \cdot A - 0,0529$	$R^2 = 0,9942$
25–55	$\ln(E) = 0,331 \cdot A + 5,0191$	$R^2 = 0,7348$
<i>Естественные елово-лиственные насаждения</i>		
<i>Весь древостой</i>		
1–23	$\ln(E) = 1,351 \cdot A + 2,7152$	$R^2 = 0,9623$
23–55	$\ln(E) = 0,404 \cdot A + 5,3883$	$R^2 = 0,9503$
<i>Еловый ярус</i>		
1–27	$\ln(E) = 1,227 \cdot A + 2,3293$	$R^2 = 0,9840$
27–55	$\ln(E) = 0,345 \cdot A + 5,1408$	$R^2 = 0,9943$

Примечание. E — текущая продукция энергии, Гдж/га-год; A — возрастной период (значение 1 соответствует возрасту 5 лет; 2 — 15 лет, ..., 6 — 55 лет).

На основе полученных данных четко просматриваются две фазы роста текущей продукции энергии в течение периода наблюдения за исследуемыми древостоями. Первая фаза характеризуется высокой скоростью повышения значения среднепериодической продукции энергии на фоне низких ее абсолютных значений, во второй фазе, напротив, наблюдается снижение скорости продуцирования энергии.

В лесных культурах временная точка фазового перехода соответствует возрасту 25 лет для елового яруса и 26 лет для насаждения в целом. В естественных насаждениях фазовый переход наблюдается соответственно в 27 и 23 года. Таким образом, характер изменения уровня текущей продукции энергии в культурах определяется лиственным ярусом, в естественных елово-лиственных насаждениях — еловым.

Скорость изменения среднепериодической продукции энергии лесных культур в первой фазе составляет  $k = 1,83 \pm 0,074$  Гдж/га-год<sup>2</sup> для всего древостоя и  $k = 2,04 \pm 0,101$  Гдж/га-год<sup>2</sup> для елового яруса. В то время как аналогичные показатели естественных елово-лиственных насаждений составляют соответственно  $k = 1,35 \pm 0,065$  и  $k = 1,23 \pm 0,052$  Гдж/га-год<sup>2</sup>. Однако данное преимущество лесных культур не реализуется в полной мере из-за низкого начального запаса энергии в экосистеме. Во второй же фазе повышение среднепериодической продукции энергии происходит с одинаковой скоростью и в лесных культурах (для всего насаждения  $k = 0,41 \pm 0,018$  Гдж/га-год<sup>2</sup>, для елового яруса  $k = 0,33 \pm 0,015$  Гдж/га-год<sup>2</sup>, и в естественных насаждениях (для всего насаждения  $k = 0,40 \pm 0,012$  Гдж/га-год<sup>2</sup>, для елового яруса  $k = 0,35 \pm 0,016$  Гдж/га-год<sup>2</sup>).

## Выводы

В результате изучения лесных культур ели в кисличных лесорастительных условиях в южной подзоне европейской тайги можно сделать следующие выводы.

1) К концу третьего класса возраста в стволовой древесине культур накопилось энергии почти в 57 раз больше, чем было израсходовано на создание и уход за ними, что говорит о целесообразности затрат на искусственное лесовосстановление.

2) В культурах ели лиственный ярус развит лучше, чем культивируемая порода, и получает большее количество ресурсов, в том числе и солнечной энергии.

3) В течение 60-летнего периода наблюдений за исследуемыми древостоями выделяются две фазы роста текущей продукции энергии. Первая фаза характеризуется высокой скоростью повышения значения среднепериодической продукции энергии на фоне низких ее абсолютных значений, во второй фазе, напротив, наблюдается снижение скорости продуцирования энергии.

4) Скорость изменения среднепериодической продукции энергии лесных культур в первой фазе выше, чем естественных елово-лиственных насаждений в 1,35–1,66 раза. Однако данное преимущество не реализуется в полной мере из-за низкого начального запаса энергии в экосистеме.

5) Для повышения продуктивности и ускорения продукции энергии необходимо интенсивно проводить лесокультурные и лесохозяйственные мероприятия в культурах первого класса возраста.

---

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иваск М. Изменчивость калорийности в органах ели европейской / Стабильность и продуктивность лесных экосистем. Тарту, 1985. С. 52–53.
2. Моисеев В.С. Таксация молодняков. Л.: ЛТА, 1971. 344 с.
3. Уткин А.И. Теплота сгорания как экологическая мера / Чтения памяти академика Сукачева. М.: Наука, 1986. С. 13–60.
4. Чмыр А.Ф. Структура и экология вторичных лиственных лесов на вырубках, и их реконструкция. СПб: СПбНИИЛХ, 2002. 234 с.