

Моделирование влияния типа посадок на рост и продуктивность древостоев

В. Г. СУХОВОЛЬСКИЙ*, Р. Г. ХЛЕБОПРОС**

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

**Институт биофизики СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

АННОТАЦИЯ

Предложена оптимизационная модель взаимодействия деревьев в древостое, в которой учитывается влияние конкуренции и кооперации на рост деревьев. На основе модели дана оценка оптимальной густоты насаждений при различных типах посадок (естественном и групповом). Проанализированы данные о росте посаженных групповым способом сосновых насаждений в горах Тянь-Шаня. Дано объяснение высокой продуктивности этих насаждений. Рассмотрены пути детализации и уточнения модели.

При закладке лесных культур встает вопрос оптимального размещения деревьев, чтобы наибольшая сохраняемость культур и наибольшая их продуктивность сочетались с наименьшими затратами труда и посадочного материала [1].

Можно выделить три типа посадок деревьев: естественные (когда саженцы размещаются случайным образом), рядовые (когда деревья высаживаются рядами с определенными расстояниями между растениями в ряду и между рядами) и групповые, когда на площадке определенного размера – гнезде – высаживается некоторое количество деревьев, образующих биогруппу; на некотором расстоянии от этого гнезда располагается другое гнездо и т. д. [2].

Естественные древостои, где деревья размещены случайным образом, можно характеризовать густотой древостоя (числом деревьев на 1 га) ρ и средним расстоянием между деревьями $\lambda = 1/\rho$. В качестве параметров, характеризующих размещение деревьев в насаждениях, посаженных групповым способом, можно использовать общую густоту насаждения ρ , число деревьев в гнезде n , эффективную плотность деревьев в гнезде ρ_1 , площадь гнезда S_1 ,

число гнезд k на 1 га. Между этими величинами имеют место следующие естественные соотношения: $\rho = k \cdot n$ и $\rho_1 = n/S_1$.

В процессе развития одновозрастных насаждений часть деревьев погибает. В насаждениях с естественным типом посадок при этом уменьшается густота насаждения. При рядовом типе посадок гибель части деревьев приводит к увеличению среднего расстояния между деревьями в ряду. При гнездовом типе посадок в процессе роста насаждения с отпадом части деревьев уменьшается число деревьев в гнезде и, возможно, число гнезд.

Изучению влияния типа посадок лесных культур на характер роста, отпада и продуктивности насаждений посвящено значительное число работ [1, 3–6]. При различных способах посадки такие характеристики насаждений, как высота и диаметр деревьев, густота деревьев, запас древесины в насаждениях, могут сильно варьировать. Так, в качестве примера рассмотрим данные о росте древостоев, посаженных гнездовым способом в горах Тянь-Шаня в 1937 г. [7, 8]. Сеянцы сосны обыкновенной высаживались в гнезда размером 1×2 м по 10 сеянцев в гнезде. Гнезда располагали рядами по-

перек склона, с расстоянием 3 м между рядами и 2 м в рядах. На 1 га при этом пришлось 500 площадок и 5 тыс. семян.

В табл. 1 отражен ход роста групповых культур сосны (по [7, 8]) и для сравнения даны оценки хода роста сосны по таблицам хода роста для II класса бонитета при естественном типе размещения деревьев в насаждении [9].

Из табл. 1 видно, что для культур, посаженных групповым способом (пробная площадь № 5), характерен очень малый отпад в возрастах 20–50 лет. Запас стволовой древесины в культурах, посаженных групповым способом, к 50-летнему возрасту в 2,2 раза больше, чем запас в культурах с естественным типом посадки. При этом различие в среднем объеме ствола дерева в культурах, посаженных групповым способом, с объемом среднего дерева в естественных насаждениях невелико. Различие же в запасе стволовой древесины в основном связано с большей плотностью насаждений, посаженных групповым способом. Если в естественных насаждениях к 50 годам плотность насаждений – 1340 шт./га, то в культурах, посаженных групповым способом – 2200 шт./га.

В древостоях в возрасте от 15 до 50 лет при групповом способе посадки и запас стволовой древесины, и плотность постоянно были выше, чем эти характеристики для чистых сосновых насаждений II класса бонитета.

Чем же объясняются такие значительные различия в плотности между древостоями, посаженными групповым способом и естественным? Для объяснения рассмотрим простую модель

взаимодействия деревьев в древостое, где учитываются эффекты как конкуренции за свет и питание, так и кооперации в защите от воздействия ветра, от иссушения почвы, подавления роста другими растениями и т. п.

Введем понятие парциальной функции экологической полезности (ПФЭП), характеризующей вероятность выживания дерева в зависимости от тех или иных параметров состояния дерева и древостоя (высота, диаметр, плотность и т. п.). Рассмотрим так называемый естественный древостой, в котором закон распределения деревьев по площади – пуассоновский с единственным параметром, характеризующим размещение деревьев в древостое – плотностью ρ [3, 4].

Для одновозрастного одноярусного древостоя ПФЭП конкуренции для отдельного дерева будет максимальна, когда вблизи от этого дерева не растут другие деревья. С увеличением плотности древостоя конкуренция между деревьями будет расти, а ПФЭП – монотонно уменьшаться. В пределе, при бесконечно большой плотности деревьев в древостое, для отдельного дерева вероятность выжить в конкурентной борьбе с другими деревьями за ресурсы стремится к нулю.

Как известно, функции полезности определяются с точностью до монотонного преобразования [10]. Исходя из этого, ПФЭП $v(\rho)$ конкуренции можно записать в следующем виде:

$$v(\rho) = A/(A + \rho), \quad (1)$$

где A – константа, численно равная значению ρ при $v(\rho) = 1/2$.

Т а б л и ц а 1

Ход роста культур сосны на Тянь-Шане (по данным П.А.Гана [7, 8])

Возраст, лет	Плотность, шт.	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Среднее число деревьев в гнезде	Запас стволовой древесины, м ³ /га	Средний объем ствола, м ³	Число гнезд на 1 га
<i>Групповые посадки (пробная площадь № 5)</i>							
15	3826	5,8	3,6		35	0,009	500,0
20	3425	8,3	6,0	6,9	65	0,019	496,4
25	3262	11,5	8,1	6,6	139	0,043	502,6
30	3107	12,7	10,1	6,2	202	0,065	501,1
35	2820	15,1	12,0	5,7	326	0,116	494,7
40	2695	16,6	14,5	5,4	428	0,159	499,1
45	2415	18,5	16,1	4,9	500	0,207	492,9
50	2197	20,0	17,5	4,5	582	0,265	488,2
<i>Естественные насаждения II класса бонитета (по всеобщим таблицам хода роста)</i>							
20	4800	7,2	7,2		72	0,015	
30	2800	10,6	10,8		136	0,49	
40	1940	14,0	14,2		208	0,107	
50	1340	17,0	17,5		274	0,204	

ПФЭП $r(\rho)$ кооперативного эффекта можно записать следующим образом:

$$r(\rho) = \rho / (B + \rho), \quad (2)$$

где константа B равна значению ρ при $r(\rho) = 1/2$.

Различия между конкурентными и кооперативными эффектами выражаются в противоположной асимптотике ПФЭП. И те и другие усиливаются с увеличением густоты древостоя, однако вероятность выживания при воздействии конкурентных эффектов уменьшается, а при воздействии кооперативных эффектов – увеличивается. Считая, что все конкурентные и кооперативные процессы взаимодействия деревьев в лесу независимы друг от друга, можно записать простейшую суммарную функцию экологической полезности (СФЭП) W , характеризующую вероятность выживания дерева при одновременном влиянии всех значимых кооперативных и конкурентных эффектов, как произведение парциальных функций экологической полезности. При этом потребуем, чтобы суммарная экологическая полезность была максимальной:

$$W(\rho) = r(\rho) \cdot v(\rho) \rightarrow \max. \quad (3)$$

Выражение (3) означает, что существует оптимальное значение густоты древостоя, при котором эффекты конкуренции и кооперации уравниваются друг друга. Для нахождения максимума функции $W(\rho)$ необходимо найти значение $\rho = \rho$ (опт.), при котором $dW/d\rho = 0$, а $d^2W/d\rho^2 < 0$. Так как на параметры (3) не накладывается никаких дополнительных условий, кроме их неотрицательности, то значение ρ , при котором $W(\rho)$ достигает максимума, находится стандартными методами [11] с помощью дифференциации выражения (3) или, что проще, выражения $R(\rho) = \ln W(\rho)$:

$$dR/d\rho = 1/\rho - 1/(A + \rho) - 1/(B + \rho) = 0. \quad (4)$$

Из (4) можно определить оптимальное значение густоты древостоя:

$$\rho \text{ (опт.)} = \sqrt{(A \cdot B)}. \quad (5)$$

Получим выражение для ПФЭП при гнездовом типе размещения деревьев. Будем использовать при этом три показателя густоты насаждения. Густота деревьев в гнезде (эффек-

тивная плотность кооперации деревьев в гнезде) определяется как $\rho_1 = n/S_1$. Эффективная плотность деревьев при конкурентных взаимодействиях $\rho_2 = n/S_2$. Площадь $S_2 = 1/k$ определяет пространство конкурентного взаимодействия деревьев в гнезде. Чем больше отношение S_2/S_1 , тем больше свободного пространства рядом с деревьями из данного гнезда и тем меньше конкуренция между этими деревьями. Эффективная плотность кооперативных взаимодействий между деревьями из соседних гнезд $\rho_3 = n/S_3$, где $S_3 = 3/k$.

Кооперативный эффект взаимодействия деревьев в этом случае будет зависеть от густоты деревьев в гнезде $\rho_1 = n/S_1$. Функция парциальной экологической полезности $r(\rho_1)$ кооперативного взаимодействия деревьев в гнезде может быть записана следующим образом:

$$r(\rho_1) = \rho_1 / (A + \rho_1), \quad (6)$$

где A – константа, численно равная эффективной плотности деревьев в гнезде, при котором вероятность выживания всех деревьев равна 0,5.

Функция парциальной экологической полезности $z(\rho_1)$ кооперативного эффекта между деревьями из разных гнезд равна:

$$z(\rho_1) = \rho_1 \cdot k \cdot S_1 / (3 \cdot A + \rho_1 \cdot k \cdot S_1). \quad (7)$$

Функция парциальной экологической полезности $v(\rho_1)$ конкуренции деревьев в гнезде может быть записана как

$$v(\rho_1) = B / (B + \rho_1 \cdot k \cdot S_1). \quad (8)$$

При малых S_1 и k соседние биогруппы расположены достаточно далеко друг от друга и деревья, принадлежащие к этим биогруппам, не конкурируют друг с другом, т. е. можно считать, что ПФЭП конкуренции деревьев различных биогрупп близка к единице, и при вычислении суммарной величины экологической полезности по формуле (3) вкладом ПФЭП можно пренебречь. Тогда для суммарной функции экологической полезности размещения деревьев при групповых посадках $F(\rho_1, k, S_1)$ получим следующее выражение:

$$F(\rho_1, k, S_1) = r(\rho_1) \cdot z(\rho_1, k, S_1) \cdot v(\rho_1, k, S_1) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Значение ρ_1 , при котором (при условии, что величины k и S_1 рассматриваются как параметры)

достигается максимум функции $F(\rho_1, k, S_1)$, можно найти аналогично тому, как это было сделано для функции $W(\rho)$, однако проще и нагляднее определить оптимальное значение числа деревьев в гнезде, строя графики зависимости $F(\rho_1, k, S_1)$ от ρ_1 при $k = \text{const}$ и $S_1 = \text{const}$.

На рис. 1 отражена зависимость величины суммарной экологической полезности от числа деревьев в биогруппе в случае, когда число гнезд на 1 га составляет 500, $A = B = 1200$. Как видно из рис. 1, функция суммарной экологической полезности принимает свое максимальное значение, когда число n деревьев в гнезде равно 4,7. Однако максимум функции суммарной экологической полезности некрутой, и практически значениям оптимального числа деревьев в гнезде от 3,5 до 6,5 отвечают мало отличающиеся друг от друга значения суммарной экологической полезности. Эти значения, вычисленные при нахождении максимального значения функции суммарной экологической полезности, хорошо согласуются с величиной среднего числа деревьев в гнезде для групповых посадок, равной 4,5 и приведенной в табл. 1. Анализ распределения гнезд по числу деревьев в гнезде (рис. 2) показывает, что в гнездах встречаются преимущественно от 3 до 6 деревьев, что согласуется с теоретическим расчетом.

Для древостоев с естественным типом размещения деревьев суммарная экологическая полезность и оптимальная густота насаждений зависят от параметров A и B уравнений (1) и (2), и будет существовать только одна кривая, описывающая зависимость значения функции суммарной экологической полезности от густоты насаждения.

Максимум же функции суммарной экологической полезности при групповых посадках достигается при разных значениях числа деревьев в гнезде в зависимости от числа гнезд на 1 га и площади гнезда. В этом случае существует не одна функция суммарной полезности, а семейство таких функций, зависящих от таких параметров, как площадь гнезда и число гнезд на 1 га. На рис. 3 отражена зависимость оптимального числа $n(\text{опт.})$ деревьев в гнезде от числа k гнезд на 1 га при посадках в гнезда площадью 2 м^2 . Как видно, с ростом k оптимальное число деревьев в гнезде монотонно уменьшается, при этом наиболее быстро это происходит при малых значениях k . Таким образом, для опти-

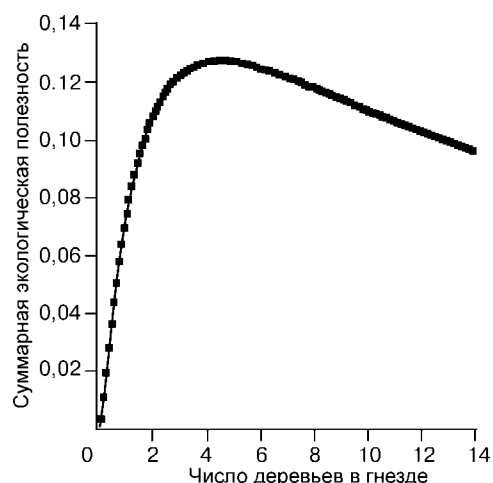


Рис. 1. Зависимость суммарной функции экологической полезности от числа деревьев в гнезде при групповых посадках.

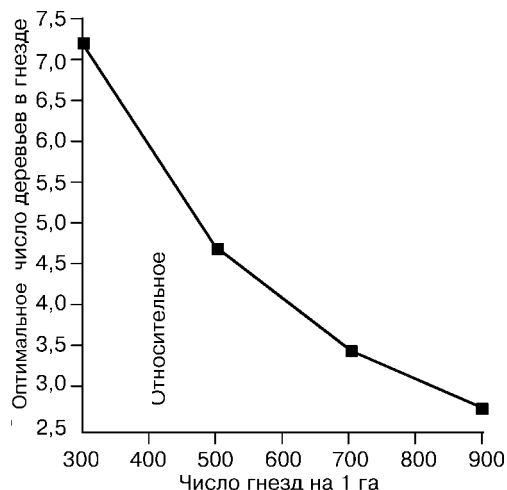


Рис. 2. Зависимость оптимального числа деревьев в гнезде от числа гнезд на 1 га.

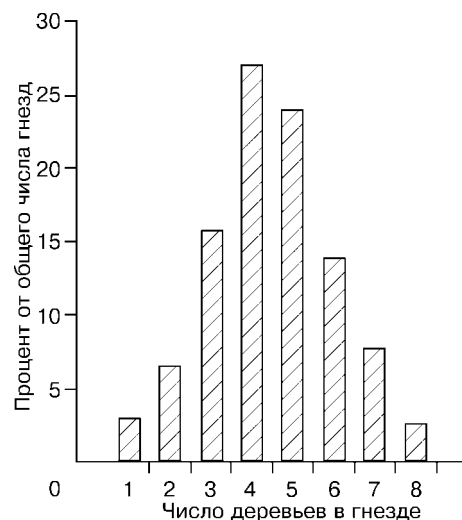


Рис. 3. Распределение числа деревьев в гнезде при групповых посадках.

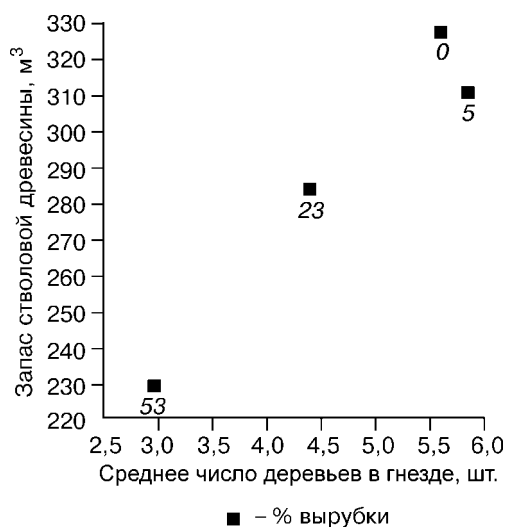


Рис. 4. Зависимость запаса ствольной древесины в 35-летнем возрасте от интенсивности рубок ухода в возрасте 20 лет.

мизации размещения деревьев при групповом способе посадки можно использовать три управляющих параметра – число деревьев в гнезде, число гнезд на 1 га и площадь гнезда.

По данным П. А. Гана, рубки ухода, проведенные в групповых посадках в возрасте 20 лет, привели к 35-летнему возрасту к уменьшению запаса ствольной древесины на участках, пройденных рубками [8]. При этом уменьшение запаса было пропорционально интенсивности рубок (рис. 4). Таким образом, в насаждениях, не пройденных рубками ухода, к 35-летнему возрасту наблюдается максимальный по сравнению с насаждениями, пройденными рубками ухода, запас древесины. Это указывает на близость параметров размещения деревьев в групповых посадках к оптимальным.

Влияние условий внешней среды – типа почв, экспозиции места посадок, высоты над уровнем моря и т. д. – в предлагаемой модели будет трансформироваться в изменение параметров A и B уравнений для парциальных экологических полезностей. В зависимости от значений A и B будут изменяться и оптимальные характеристики групповых посадок. Таким образом, для расчета оптимальных параметров посадок необходимо предварительно определить значения A и B для конкретных местообитаний. Идентификация параметров A и B уравнений для ПФЭП представляет собой достаточно трудную задачу. Если считать уже растущие насаждения оптимальными, то, как это видно из уравнения

(5), по оптимальному значению густоты насаждений или числу деревьев в гнезде можно определить лишь значение произведения $A \cdot B$, а не каждого из параметров в отдельности. Ситуация здесь аналогична той, что возникает при решении задач идентификации параметров в эконометрике [12].

Являются ли более продуктивные групповые посадки одновременно и более устойчивыми? Как характеристику устойчивости в рассматриваемой модели можно использовать значение максимума суммарной функции экологической полезности. Для естественных насаждений при выбранных значениях параметров A и B функций парциальной экологической полезности суммарная экологическая полезность равна 0,21. Для групповых посадок при различных значениях параметров размещения деревьев величины суммарной экологической полезности изменяются в пределах от 0,08 до 0,11. Если считать, что функция экологической полезности – вероятность выживания деревьев – характеризует выживаемость деревьев, то меньшие значения суммарной экологической полезности насаждения при групповом способе посадки означают меньшую устойчивость таких насаждений. Можно, таким образом, говорить об обратной зависимости между устойчивостью (максимальной для естественных насаждений) и продуктивностью (максимальной для насаждений с групповым способом посадки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модель объясняет зависимость продуктивности насаждений от способа размещения деревьев в насаждении. Если параметры функций парциальных экологических полезностей определены, то с помощью предлагаемой модели можно выбрать оптимальные характеристики размещения деревьев.

Групповые посадки перспективны при создании плантаций быстрорастущих деревьев, при их закладке требуется меньше посадочного материала, продуктивность этих насаждений при правильном выборе характеристики размещения деревьев существенно выше, однако может возникнуть опасность уменьшения устойчивости таких насаждений.

Особенно важно создать оптимальные условия для кооперативного взаимодействия де-

решений в насаждениях, растущих при неблагоприятных условиях среды, например, таких, как в горах Тянь-Шаня, где высокая степень аридности сочетается с сильной продуваемостью насаждений. Но даже в этих условиях оптимизация кооперативных взаимодействий между деревьями позволила выращивать насаждения, продуктивность которых сравнима с продуктивностью сосняков, растущих в Сибири по I бонитету.

Представляется, что рассмотренная модель является наиболее простой из класса оптимизационных моделей, учитывающих как конкурентные, так и кооперативные взаимодействия деревьев в лесу и использующих представления о том, что процессы роста деревьев в древостое происходят таким образом, что вероятность выживания деревьев максимальна.

В рассмотренной модели предполагается, что в процессе роста насаждений деревья не ограничены в ресурсах – свете, минеральных веществах и т. п. Однако такое предположение весьма упрощающее.

В реальных древостоях объем ресурсов, доступных для деревьев, ограничен. Это означает, что для решения задачи оптимизации густоты насаждений с учетом дополнительных ограничений на объем доступных деревьям ресурсов необходимо использовать более сложные модели, в которых на параметры оптимизационной функции будут накладываться дополнительные ограничения в виде равенств или неравенств, а оптимизация будет производиться методом множителей Лагранжа или методами нелинейного программирования [11, 13].

Для того чтобы оптимизировать процесс выращивания во времени – назначать оптималь-

ные сроки рубок ухода и интенсивность рубок, начальные параметры густоты и параметры размещения деревьев – необходимы еще более сложные по сравнению с рассмотренной в настоящей работе динамические модели. Необходимо также решить задачу идентификации параметров уравнений для ПФЭП и выявить зависимость этих параметров от природных условий территорий, ландшафтных характеристик мест посадки насаждений.

Работа поддержана РФФИ (грант 98-04-48502).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Георгиевский, Рубки ухода за лесом, М., Гослесбумиздат, 1957.
2. А. Грейг-Смит, Количественная экология растений, М., Мир, 1967.
3. Анализ структуры древесных ценозов, А. И. Бузыкин, В. Л. Гавриков, О. П. Секретенко, Р. Г. Хлебопрос, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1985.
4. Структурно-функциональные взаимосвязи и продуктивность фитоценозов. Красноярск, 1983, 5–12.
5. М. А. Проскуряков, Биоэкологические исследования в еловых лесах Тянь-Шаня, Алма-Ата, 1981, 42–54.
6. М. А. Проскуряков, Горизонтальная структура горных темнохвойных лесов, Алма-Ата, Наука, 1983.
7. П. А. Ган, Н. П. Ган, *Лесоведение*, 1972, 6, 21–30.
8. П. А. Ган, Там же, 1987, 2, 43–49.
9. Н. В. Третьяков, П. В. Горский, Г. Г. Самойлович, Справочник таксатора, М.-Л., Гослесбумиздат, 1952.
10. Дж. Р. Хикс, Стоимость и капитал, М., Прогресс, 1993.
11. Дж. Хедли, Нелинейное и динамическое программирование, М., Мир, 1967.
12. Ф. Фишер, Проблема идентификации в эконометрии, М., Статистика, 1978.
13. А. И. Бузыкин, В. Г. Суховольский, Р. Г. Хлебопрос, Принцип максимальной экологической полезности и кооперативные эффекты в горизонтальной структуре древостоя, Красноярск, 1995, Препринт ИБФ СО РАН.

Simulation of the Influence of the Plantation Type on the Growth and Productivity of Tree Stands

*V. G. SUKHOVOLSKY, **R. G. KHLEBOPROS

* V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Acad. Sci

**Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Acad. Sci.

An optimization model of interaction of trees in a forest stand is proposed in which the influence of competition and cooperation on the tree growth is taken into account. Based on this model, an estimate of the optimal thickness in various plantation types (natural and groupwise) is given. Data on the growth of pine stands planted in the groupwise way in the Tien Shan mountains are presented. An explanation of the high productivity of these plantations is given. Ways of specification of the model are considered.