

УДК 630\*182:630\*181.65:630\*221.04

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

А. Н. Борисов, В. В. Иванов

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

E-mail: alnik\_borisov@mail.ru, viktor-forest1954@yandex.ru

*Поступила в редакцию 08.02.2022 г.*

Предложена имитационная модель роста сосновых древостоев, позволяющая в условиях конкуренции за доступный ресурс рассчитать прирост по диаметру ствола для каждого дерева на моделируемом участке, а также производные таксационные показатели: густоту, полноту, запас стволовой древесины, и отследить динамику всех этих показателей с шагом в один год с учетом взаимного расположения деревьев в древостое, их размеров и количество доступного ресурса для каждого дерева. Верификация модели выполнена с использованием материалов многолетних исследований на постоянных пробных площадях, заложенных в молодняках, средневозрастных и спелых древостоях. Рассмотрено несколько сценариев роста сосновых древостоев, изучено влияние рубок на средний диаметр ствола и прирост по диаметру; средний годовой прирост; густоту древостоя; запас стволовой древесины. Предложенная имитационная модель является эффективным инструментом изучения роста древостоев и служит альтернативой трудоемким натурным исследованиям, которые затруднительно реализовать на длительных временных интервалах. Моделирование позволяет изучить влияние рубок в лесах различного целевого назначения. Путем варьирования интенсивности и периодичности рубок при моделировании на основе анализа динамики основных таксационных показателей можно выбрать систему мероприятий по уходу за лесами, обеспечивающую наиболее полную реализацию задач по интенсивному лесовыращиванию.

**Ключевые слова:** *сосняки, конкуренция, рубки ухода, доступный ресурс, область доминирования.*

DOI: 10.15372/SJFS20220305

### ВВЕДЕНИЕ

В повышении устойчивости и продуктивности сосновых насаждений важная роль принадлежит рубкам ухода за лесом, основная задача которых состоит в обеспечении более эффективного использования лесовосстановительного, продукционного и ресурсно-экологического потенциала лесных экосистем. Они направлены на формирование хозяйственно-ценных насаждений от момента смыкания молодняков до возраста спелости. По мнению А. А. Онучина (Ученые..., 2022), рубки ухода могут дать гораздо больший прирост на участке леса, чем посадка нового леса, и при должном уходе возможно получение дополнительного прироста в объеме до  $14 \text{ м}^3/(\text{га} \cdot \text{год})$ . Систематические рубки ухода в высокополнотных одновозрастных сосновых древостоях увеличивают до 50 % хозяйственный

эффект за счет использования потенциального отпада (Бузыкин и др., 2002).

Понимание влияния густоты и разреживания на процесс роста деревьев в условиях конкуренции за ресурсы является важной задачей. В ряде работ высказывается предположение, что существуют оптимальные густота и полнота древостоя. Считается, что максимальный прирост достигается при полноте ниже 1.0 (Assmann, 1961; Поляков, 1973; Антанайтис и др., 1986; Кузьмичев, 2013). Регулировать продуктивность насаждений можно выборочными и постепенными рубками. Это также позволяет сократить оборот рубки и получить значительные лесоводственный и хозяйственный эффекты. Критерий оптимизации структуры древостоев определяется прежде всего его целевым назначением. Рубки ухода в лесах эксплуатационного назначения, как считает З. Я. Нагимов (2000), должны к воз-

расту спелости сформировать древостой с такими полнотой и запасом, которые приближаются по параметрам к нормальному древостою.

Выявление закономерностей роста деревьев – неперенный этап решения задачи обеспечения оптимальных условий роста с использованием системы лесохозяйственных мероприятий. Методы анализа данных в этих исследованиях имеют широкий спектр и часто включают моделирование динамики роста древостоев (Разин, 1981; Антанайтис и др., 1986; Grabarnik, Sarkka, 2009; O'Rourke, Kelly, 2015). Такие модели предназначены, прежде всего, для выявления закономерностей роста по высоте, запасу и диаметру ствола с учетом возраста древостоев и их густоты. Процессы роста напрямую зависят от количества доступного ресурса и от того, как этот ресурс будет распределяться между конкурирующими особями. Многие исследователи в качестве оценки доступного ресурса используют площадь роста дерева. Существует значительный набор методов ее расчета (Поляков, 1973; Нагимов, 2000; Вайс, 2005; Чернов и др., 2012).

Цель работы – выявить закономерности роста сосновых древостоев методом имитационного моделирования различных сценариев лесоводственного ухода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служили молодняки, средневозрастные и спелые, чистые по составу сосновые одновозрастные насаждения

Красноярской островной лесостепи. С учетом теоретических положений таксации (ОСТ..., 1983) в одновозрастных сосновых насаждениях I–II класса бонитета были заложены постоянные пробные площади (пп), на которых проводились рубки и выполнялись периодические обследования (Онучин и др., 2011; Иванов и др., 2017). Основные таксационные характеристики пробных площадей приведены в таблице.

В молодняках естественного происхождения были заложены пп размером 20 × 20 м, на которых провели рубки ухода с интенсивностью по числу стволов от 93 до 57 % и выполнен сплошной пересчет с измерением высот деревьев и диаметров стволов у шейки корня. На каждой пп отбирали по 5 модельных деревьев.

В средневозрастном сосняке зеленомошном I класса бонитета были заложены три пп размером 0.15 га, находящиеся в одном таксационном выделе, и отделенные друг от друга буферной зоной.

Спелые сосновые древостои в возрасте 105–110 лет на пп представлены сосняками разно-травно-зеленомошной группы типов леса. Пробные площади закладывались в пределах одного таксационного выдела на участках с разной интенсивностью выборочной рубки по запасу. На пп проводились сплошной пересчет, нумерация деревьев и их картирование.

Текущий периодический прирост изучался по запасу (в м<sup>3</sup>/га), который определялся по диаметру – сумме площади поперечных сечений, по высоте, а также по соотношениям этих показателей – видовым числам (Науменко, 1948; Дворецкий, 1964; Лиела и др., 1977; Антанайтис,

Основные таксационные показатели древостоев на пробных площадях

Номер пп*	Возраст, лет	Густота, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Сумма площадей сечения, м <sup>2</sup> /га	Полнота	Запас, м <sup>3</sup> /га
1	13	2900	8.0	6.2	14.7	–	51.6
2	13	9450	5.4	5.4	21.7	–	73.4
3	13	16830	4.2	5.6	22.9	–	83.2
4к	13	34200	3.3	5.5	28.9	–	109.3
5	47	2420	15.8	19.0	47.4	1.4	415
6	47	2073	17.1	19.6	50.5	1.5	456
7	47	2367	16.2	19.2	49.0	1.4	431
8к	47	2640	15.4	18.4	48.9	1.3	433
9	120	528	32.2	28.4	42.9	1.2	462
10	110	301	32.7	25.2	25.3	0.7	261
11	110	226	32.8	23.1	19.2	0.5	198
12к	120	384	38.8	25.5	45.4	1.0	523

\* Пробные площади с номером, имеющим индекс «к», являются контролем.

1986). Кроме того, для средневозрастных и спелых насаждений методами дендрохронологии анализировались керны, взятые не менее чем у 15 деревьев с пп и представленные всеми ступенями толщины. Дополнительно на пп 6 выполнен массовый отбор кернов, охвативший 81 % от общего количества деревьев исследуемого участка.

Данные по проективному покрытию крон анализировались по материалам крупномасштабной съемки, сделанной с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro, с использованием методов ГИС-технологий в программе ArcMap.

Анализ различных сценариев рубок и изучение их влияния на рост сосновых древостоев выполнены методом имитационного моделирования с использованием оригинальной программы, реализованной на языке Object Pascal в Delphi.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние воздействия рубок на рост деревьев и продуктивность древостоев исследовались с помощью метода имитационного моделирования. С этой целью использовалась модель роста деревьев, которая рассчитывала характеристики деревьев на исследуемых участках с периодичностью в один год. Имитационная модель роста основана на учете конкуренции за доступный ресурс. Для описания роста дерева по диаметру ствола использовалось следующее балансное уравнение:

$$\Delta D = k_1 [P^\alpha - k_2 (D / D_{\max})^\beta], \quad (1)$$

где  $P$  – доступный для дерева ресурс;  $D$  – текущий диаметр ствола на высоте 1.3 м;  $D_{\max}$  – максимальный диаметр ствола для данных условий произрастания;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры.

Обычно оценку доступного ресурса дают по площади роста. Среди использующих полигоны роста наиболее распространен метод Ф. К. Stöhr (1963). Полигоны в нем формируются с учетом диаметров стволов ближайших соседей таким образом, чтобы граница между этими соседями проходила дальше от более крупного дерева и ближе к тонкому пропорционально диаметрам их стволов. Следует отметить, что у этого метода и аналогичных ему есть ряд недостатков. Во-первых, на полигоны разбивается вся территория, когда даже прогалины могут быть отнесены к площади роста дерева. Во-вторых, при разделении зон влияния между деревьями, раз-

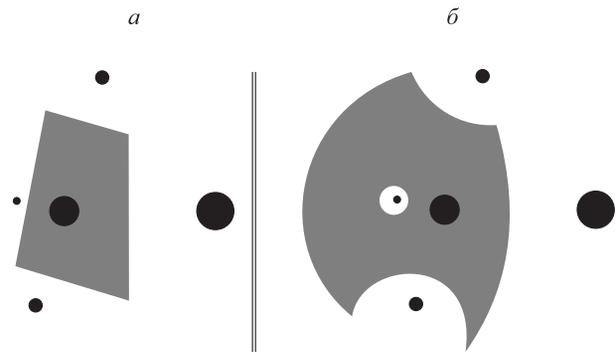


Рис. 1. Площадь роста по методу Ф. К. Stöhr (1963) (а) и область доминирования (б).

личающимися по диаметрам стволов, меньшее дерево с экологической точки зрения отчуждает от большего непропорционально большой фрагмент площади роста. Это несоответствие проявляется тем очевиднее, чем больше разница диаметров стволов конкурентов.

В настоящей работе в качестве оценки количества доступного ресурса используется площадь области доминирования ( $S_{\text{ОД}}$ ) (Борисов и др., 2019). Метод областей доминирования свободен от указанных выше недостатков. В области доминирования (ОД) особь оказывает доминирующее влияние в освоении ресурса. При этом предполагается, что оно прямо пропорционально размеру особи и обратно пропорционально квадрату расстояния от нее. Графический пример, иллюстрирующий различия в формировании областей влияния для ближайших соседей разного диаметра ствола, приведен на рис. 1.

Размеры кругов на рисунке пропорциональны диаметрам стволов на высоте 1.3 м ( $d_{1.3}$ ).

В одновозрастных сосновых насаждениях проанализированы данные, полученные на пп. Проведенный анализ показал наличие тесной связи между диаметрами стволов, а также приростом по диаметру с размером  $S_{\text{ОД}}$ . Для изучения зависимости  $d_{1.3}$  от  $S_{\text{ОД}}$  использовались данные по насаждениям в возрасте 37 лет (пп 5–7). Такой выбор обусловлен тем, что диаметр ствола отражает кумулятивный эффект роста дерева в зависимости от доступного для его роста ресурса, который практически не менялся до 37-летнего возраста, поскольку на этих пп не проводилось рубок. С помощью регрессионного анализа выявлена следующая зависимость диаметра ствола от  $S_{\text{ОД}}$ :

$$d_{1.3} = 5.63 + 1.94 \times S_{\text{ОД}}; R^2 = 0.79. \quad (2)$$

Реакция деревьев на рубку изучалась по динамике годичного радиального прироста ство-



Рис. 2. Радиальный прирост на контрольном участке (1) и участке, пройденном рубкой (2).

лов. Для этого использовались данные пп 5–7, на которых проводились рубки в 37- и 47-летнем возрасте с интенсивностью рубки по запасу 15 и 29 % соответственно. В спелых насаждениях на пп 9 интенсивность рубки, проведенной в возрасте 105 лет, составила 20 %, на пп 10 для деревьев в возрасте 110 лет – 35 %, а на пп 11 в возрасте 110 лет – 50 %.

На рис. 2 приведены данные по радиальному приросту: для модельного дерева в отсутствие экзогенных воздействий (контроль) и для дерева на пп 6, у которого в результате рубки  $S_{од}$  увеличилась на 1.5 м<sup>2</sup>. В течении нескольких лет после рубки, начиная со следующего года, происходит увеличение прироста по диаметру. При изучении прироста по диаметру выявлено, что он зависит от увеличения площади области доминирования ( $dS$ ) после рубки. При значении  $dS > 1.5$  м<sup>2</sup> радиальный прирост увеличился с 0.9 до 1.7 мм/год, при  $1.5 > dS > 0.5$  м<sup>2</sup> – с 0.7 до 1.3 мм/год, а для  $dS < 0.5$  м<sup>2</sup> – с 0.6 до 0.9 мм/год.

Количество ресурса, доступного для каждого дерева в древостое, влияет не только на рост по диаметру ствола, но и на все другие компоненты дерева. Это хорошо заметно на примере крон (О'Нара, 1988). В насаждениях с высокой плотностью хорошо проявляется дифференциация по степени развитости крон, ее протяженности и степени охвоения. Даже в одновозрастном древостое можно встретить деревья всех классов по Крафту. Эндогенные и экзогенные факторы оказывают влияние не только на диаметр ствола и его прирост, но и на формирование крон, поэтому ожидаемо, что рубки ухода приводят к изменениям в форме крон и площади их проекции вследствие увеличения доступного ресур-

са и улучшения условий роста (Borisov, Ivanov, 2019).

Для изучения влияния количества доступного ресурса на формирование крон использовались съемка, сделанная с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА), и данные картирования пп. Площади проекций крон  $S_{кр}$  и сомкнутость полога определялись методом GIS-технологий с использованием программы ArcMap. На рис. 3 приведен фрагмент исследуемого участка, на котором показано размещение деревьев, расположение крон относительно положения стволов и границы ОД. Диаметры кругов пропорциональны значениям  $d_{1,3}$ .

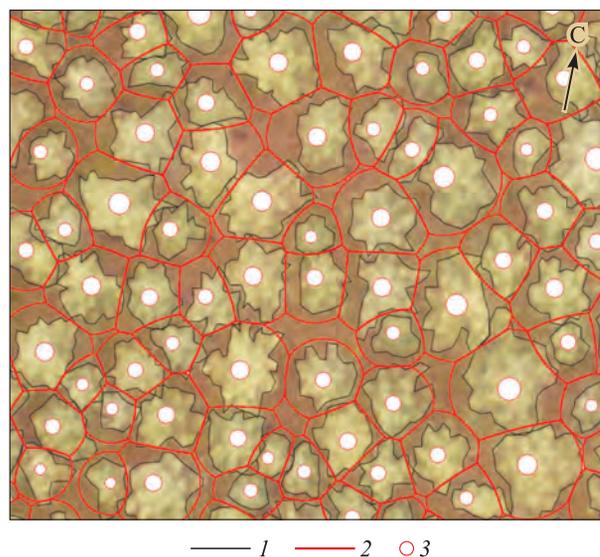


Рис. 3. Фрагмент пп 6 средневозрастного соснового древостоя.

1 – контуры крон; 2 – границы областей доминирования; 3 – положение стволов деревьев.

Проведенный регрессионный анализ позволил получить уравнение, описывающее связь между  $S_{кр}$  и  $S_{од}$ :

$$S_{кр} = 0.655 + 0.345 \times S_{од}; R = 0.84.$$

Исследования показали, что в условиях конкуренции за доступный ресурс  $S_{од}$  тесно связана с темпами роста дерева, и её использование в качестве оценки доступного ресурса  $P$  в уравнении 1 обосновано. Непосредственно сама имитационная модель реализована на языке Object Pascal в Delphi. В рамках этой программы производится генерация участка древостоя с заданными параметрами, соответствующими характеристикам изучаемого объекта. Поскольку деревья на участке имеют различия в темпах роста, происходит отпад, проводятся рубки и ОД деревьев меняются, то перерасчет значений диаметров стволов и соответствующей этим деревьям  $S_{од}$  проводились с интервалом в один год. Прирост по диаметру вычислялся в соответствии с уравнением 1. Методика и алгоритмы вычисления значений  $S_{од}$  и площади свободного роста ( $S_f$ ), необходимых для моделирования, описаны в работе А. Н. Борисова и соавт. (2019). На каждом шаге моделирования данные по характеристикам каждого дерева, включая значения  $S_{од}$ , заносились в базу данных, используя которую аналитический блок программы позволяет провести статистический анализ по любому временному диапазону. Графический блок программы предназначен для визуализации данных по динамике тех или иных характеристик, а также позволяет выводить в графическом виде схему размещения деревьев на участке и соответствующие им границы ОД.

При имитационном моделировании роста верификация модели осуществлялась на основе данных, полученных на пробных площадях. Размер моделируемого участка составлял  $40 \times 40$  м на местности. В процессе моделирования генерировались исходные реализации со случайным размещением деревьев, густота при этом соответствовала густоте на пп в заданном возрасте, а распределение стволов по ступеням толщины соответствовало характеристикам пп. Параметры модели подбирались такие, чтобы рост особей и отпад проходили так же, как и на пп. Методом имитационного моделирования путем варьирования выбирались значения параметров, при которых прирост в модели соответствовал данным натурных исследований на пп. Значение масштабного коэффициента  $k_1$  бралось таким,

чтобы совпадал среднегодовой прирост деревьев в модели и на пп.

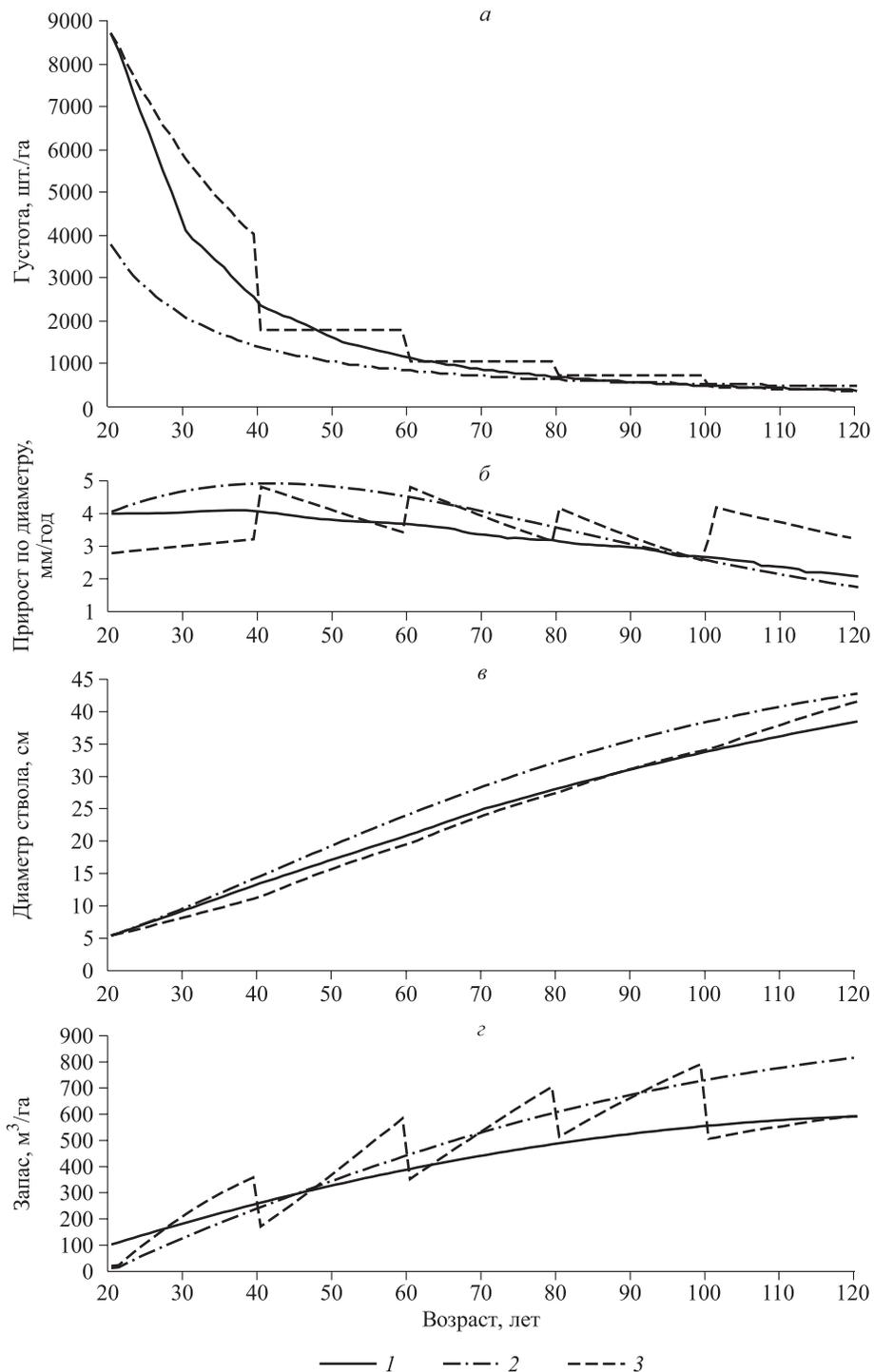
Для чистых по составу сосновых насаждений с использованием предложенной модели получена динамика густоты насаждения, годичного прироста по диаметру ствола, диаметра ствола на высоте 1.3 м и запаса стволовой древесины. Для сравнения использованы данные для полных древостоев в этих же условиях местообитания (Швиденко и др., 2008).

На рис. 4 данные для нормального древостоя представлены кривыми 1.

Кривые 2 показывают динамику указанных показателей, полученных при моделировании в случае, когда  $S_{од}$  в процессе роста составляет 30 % от  $S_f$  дерева. Показано (Борисов и др., 2019), что в этом случае деревья эффективно используют доступный ресурс, имеют хорошо развитую крону и устойчивый рост по диаметру и объему ствола. Такие значения  $S_{од}$  обеспечивают компромисс между увеличением прироста по объему ствола за счет доступного ресурса и ростом запаса древостоя за счет большей густоты. Кривые 3 относятся к сценарию системы рубок ухода за лесом, когда с возраста 40 лет густота древостоя через каждые 20 лет снижается до значений, обеспечивающих  $S_{од}$  в размере 30 % от  $S_f$ .

Рассматривая данные, приводимые в таблицах хода роста нормальных древостоев, следует отметить, что древостой может соответствовать показателям, приведенным в этих таблицах, только в некоторый период своего роста. В. В. Кузьмичев (2013) отмечал, что: «древостои с равной на определенном этапе роста полнотой по площади сечения, но с разной историей развития, могут в дальнейшем показать несравнимый ход роста». Таким образом, ход роста нормального древостоя рассматривается здесь как пример некоторого абстрактного древостоя, и используется для сравнения с ним динамики роста модельных рядов. В этом же ключе рассматривается модельный вариант 2 (рис. 4, а), в котором подразумевается, что постоянно поддерживается густота, обеспечивающая  $S_{од}$  в размере 30 % от  $S_f$  дерева.

При сравнении динамики варианта 2, видим, что в возрасте 20 лет густота хотя и ниже в 2.3 раза, чем в нормальном древостое, но в 40 лет, при меньшей густоте в модели, их запасы практически сравнялись. Это объясняется тем, что в период от 20 до 40 лет очень велика конкуренция, и при более высокой густоте это приводит к существенному ослаблению в целом деревьев небольшого диаметра и крупных особей, и,



**Рис. 4.** Модель роста деревьев при различных сценариях регулирования густоты древостоев.

как следствие, снижению прироста по диаметру. Прирост по диаметру в модели превышал таковой для нормального древостоя (рис. 4, б) в течение всего периода от 20-летнего возраста до 90 лет. Далее в этом сценарии запас древостоя по модели постоянно увеличивается вплоть до 817 м³/га в возрасте 120 лет против 596 для нормального древостоя.

Сценарий варианта 3 предусматривает проведение рубок каждые 20 лет, начиная с 40-летнего возраста. Интенсивность разреживания древостоя делается такой, чтобы после рубки в результате перераспределения доступного ресурса между оставшимися деревьями обеспечивалась  $S_{Од}$  в размере 30 % от  $S_{Г}$ . После каждой рубки прирост по диаметру увеличивался на

1–2 мм/год, снижаясь к моменту следующей рубки до уровня прироста в нормальном древостое. Интенсивность рубок составляла от 27 до 49 % по запасу, что в абсолютных значениях давало от 169 до 288 м<sup>3</sup>/га. При этом к возрасту 120 лет запас ствольной древесины в вариантах 1 и 3 практически совпадал (рис. 4, з). Следует отметить, что средний диаметр ствола в 120 лет составлял для нормального древостоя 38.5 см, а для модели (вариант 3) – 42.8 см.

Меняя в сценариях рубок их периодичность и интенсивность на разных этапах роста деревьев, можно подобрать систему рубок ухода за лесом, обеспечивающую к возрасту спелости не только заданные характеристики древостоя, но и наиболее эффективное использование доступных ресурсов на протяжении всего периода роста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование системы лесохозяйственных мероприятий позволяет существенно влиять на формирование древостоев на различных этапах его развития. Регулирование густоты древостоя снижает конкурентные отношения до уровня, при котором не происходит замедление темпов роста деревьев. Хотя при повышенной густоте продуктивность древостоя может быть высокой, но этому сопутствует пониженная производительность составляющих насаждение особей. В случае необходимости получения деловой древесины крупных размеров густоту древостоя следует снижать, увеличивая уровень доступного ресурса. В лесах водоохранного назначения, рекреационных и др. возникают аналогичные проблемы, требующие поиска компромиссного решения. Изучение влияния рубок, их интенсивности и периодичности на рост древостоев на основе натурных исследований связано с большой трудоемкостью этих работ и необходимостью проведения исследований на больших временных интервалах.

При решении таких задач незаменимым инструментом являются методы моделирования. Предложенная имитационная модель роста деревьев использует площадь области доминирования в качестве оценки ресурса, необходимого для этого. Анализ данных, полученных на постоянных пробных площадях, заложенных в одновозрастных сосновых молодняках, средневозрастных и спелых древостоях, показал тесную связь размеров крон и прироста по диаметру ствола деревьев с площадью области доминирования. Это свидетельствует о том, что

площадь области доминирования может обоснованно применяться как оценка доступного для дерева ресурса. Для верификации модели использовались данные многолетних наблюдений на постоянных пробных площадях. Имитационное моделирование для одновозрастных сосновых насаждений позволило с возраста от 20 до 120 лет с интервалом в один год проследить динамику густоты древостоя, диаметра стволов и ежегодного прироста, а также запаса ствольной древесины. Не менее сырьевых важны экологические функции леса (депонирование углерода, водоохранные, почвозащитные и др.). В связи с этим критерий оптимальности при выборе хозяйственных мероприятий будет зависеть от целевого назначения леса. Имитационное моделирование позволяет рассмотреть различные сценарии рубок, различающиеся как их интенсивностью на разных этапах формирования древостоя, так и периодичностью проведения этих мероприятий. Такой подход позволяет для любой категории лесов выбрать систему лесоводственного ухода, обеспечивающую наиболее полную реализацию задач по интенсивному лесовыращиванию.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Развитие научно-образовательного Центра мониторинга климатически активных веществ (Углерод в экосистемах: мониторинг) в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антанайтис В. В., Тябера А. П., Шляптеня Я. А. Законы, закономерности роста и строения древостоев. Каунас: Литов. с.-х. акад., 1986. 157 с.
- Борисов А. Н., Иванов В. В., Петренко А. Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 1–12.
- Бузыкин А. И., Пиеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-ние, 2002. 152 с.
- Вайс А. А. Оптимизация горизонтальной структуры смешанных разновозрастных пихтовых древостоев // Лесн. таксация и лесоустройство. 2005. № 2. С. 17–21.
- Дворецкий М. Л. Текущий прирост древесины ствола и древостоя. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 126 с.
- Иванов В. В., Борисов А. Н., Петренко А. Е., Семякин Д. А., Собачкин Д. С., Собачкин Р. С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 102–109.
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев. Новосибирск: Наука, 2013. 207 с.

- Лиена И. Я., Мауринь А. М., Рамане К. К. Оценка реакции древостоя как основного критерия антропогенного воздействия // Антропогенность наземных биоценозов и прикладная экология. Таллин, 1977. С. 114–166.
- Нагимов З. Я. Закономерности роста и формирования надземной фитомассы сосновых древостоев: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург: УГЛТУ, 2000. 40 с.
- Науменко И. М. Текущий объемный прирост насаждений // Науч. зап. Воронеж. лесохоз. ин-та. Воронеж: Воронеж. обл. кн. изд-во, 1948. Т. 9. С. 121–148.
- Онуцин А. А., Маркова И. И., Павлов И. Н. Влияние рубок ухода на радиальный прирост стволов и формирование сосновых молодняков // Хвойные бореал. зоны. 2011. № 2–3. С. 258–267.
- ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1984. 60 с.
- Поляков А. К. Определение оптимальной густоты сосны в свежей субори // Лесн. хоз-во. 1973. № 12. С. 14–18.
- Разин Г. С. Способ определения оптимальной текущей густоты древостоев при их целевом выращивании // ИВУЗ. Лесн. журн. 1981. № 3. С. 45–48.
- Ученые: актуальное положение дел в лесном секторе экономики России требует изменений в лесной политике. 26 января 2022 г. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2022.
- Чернов Н. Н., Соловьев В. М., Нагимов З. Я. Методические основы лесокультурных исследований. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 421 с.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е, доп. М.: Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.
- Assmann E. Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbestaenden. BLV Verlagsgesellschaft, Muenchen; Bonn; Wien, 1961. 490 p.
- Borisov A. N., Ivanov V. V. *Pinus sylvestris* L. growth depending on available resources in ecological niche // Environ. Analys. & Ecol. Stud. 2019. V. 5. Iss. 5. P. 71–73.
- Grabarnik P., Sarkka A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // Ecol. Model. 2009. V. 220. Iss. 9. P. 1232–1240.
- O'Hara K. L. Stand structure and growing space efficiency following thinning in an even-aged Douglas-fir stand // Can. J. For. Res. 1988. V. 18. Iss. 7. P. 859–866.
- O'Rourke, Kelly G. E. Spatio-temporal modelling of forest growth spanning 50 years – the effects of different thinning strategies // Proc. Environ. Sci. 2015. V. 26. P. 101–104.
- Stöhr F. K. Erweiterungsmöglichkeit der Winkelzahlprobe: Diss. Freiburg, 1963. 125 p.

## SIMULATION MODELING OF THE GROWTH OF PINE STANDS

A. N. Borisov, V. V. Ivanov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch  
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: alnik\_borisov@mail.ru, viktor-forest1954@yandex.ru

A simulation model of the growth of pine stands is proposed. The model, taking into account the competition for the available resource, allows to calculate the increase in trunk diameter for each tree in the simulated area, as well as to derive the taxation characteristics: stand density, completeness, stock of stem wood and make monitoring the dynamics of all these indicators in increments of one year. The model takes into account the relative location of trees in the tree stand, their size and the amount of available resource for each tree. The verification of the model was carried out using the materials of long-term research on permanent research plots of young, middle-aged and ripe stands. Several scenarios for the growing of pine stands are considered. The influence of cutting on the dynamics of a number of taxation characteristics is studied. These are the average diameter the average diameter of the trunk and the increase in diameter, the value of the average annual increase; the density of the stand; the stock of stem wood. The proposed simulation model is an effective tool for studying the growing of stands and serves as an alternative to time-consuming field studies, which are difficult to implement over long time intervals. Modeling allows studying the impact of logging in forests for various destinations. It is possible to choose such a system of forest care activities using the analysis of the dynamics of the main taxation indicators, which provides the most complete implementation of the tasks of intensive reforestation by varying the intensity and frequency of cutting during modeling.

**Keywords:** *pine stands, competition, care logging, available resource, dominating area.*

**How to cite:** Borisov A. N., Ivanov V. V. Simulation modeling of the growth of pine stands // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 3. P. 40–47 (in Russian with English abstract).