

УДК 630*221.04: 630*181.41

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМНОХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПРИ ВЫБОРОЧНЫХ РУБКАХ

А.Н. Борисов, В.В. Иванов

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок, 50; e-mail: institute@forest.akadem.ru

Изучена динамика темнохвойных древостоев при выборочных рубках. Предложена имитационная модель, описывающая процесс прироста по диаметру ствола с учетом условий местообитания, расстояния до соседей и их взаимных размеров. Верификация модели выполнена по натурным данным пробных площадей елово-пихтовых насаждений. Смоделированы различные сценарии выборочных рубок. Разработанная модель позволяет описывать динамику темнохвойных древостоев и обоснованно предлагать оптимальные виды, объемы рубок и их периодичность с учетом конкретных характеристик древостоев и условий местообитания.

Ключевые слова: имитационная модель, темнохвойные древостои, выборочные рубки

Dynamics dark-coniferous forest stands is investigated at selection thinning. The imitating model describing process of a species grows in view of conditions of a habitat, distances up to neighbors and their mutual sizes is offered. Verification of model is based on the data of the trial areas of dark-coniferous stands. Some variants of selective cabins are simulated. The suggested model allows describing dynamics dark-coniferous forest stands and offering optimum thinning kinds, intensity and periodicity taking into account concrete characteristics of forest stands and conditions of their habitat.

Key words: imitating mode, dark-coniferous forest stands, selection thinning

ВВЕДЕНИЕ

Одним из мероприятий, позволяющих в значительной степени удовлетворять потребности лесного хозяйства в древесине, обеспечивать лесовозобновление без смены пород естественным путем, сохранять полезные многообразные функции лесов, являются выборочные и постепенные рубки. Они в наибольшей степени отвечают природе разновозрастных лесов, а результаты их зависят от правильного и грамотного проведения (В.Н.Валяев, 1984). «...Они удаются только тогда, когда имеются хорошо обученные служащие, опытная рабочая сила, когда в лесничестве ведутся заготовки хозяйственным путем...» (И.Р.Морозов, 1928, с.21).

Большинство лесоводов отмечает, что выборочными и постепенными рубками можно увеличить продуктивность насаждений, сократить оборот рубки, снизить затраты на лесовосстановление и получить значительный лесоводственный и хозяйственный эффект. Выборочные рубки предусматривают периодическое удаление части деревьев определенного возраста, размеров, качества или состояния. Площадь, пройденная рубкой, остается постоянно покрытой лесом при сомкнутости не менее 0,4-0,5 и сохраняет способность выполнения водоохранно-защитных функций.

Несплошные рубки, несмотря на их высокую эколого - лесоводственную эффективность, имеют ряд ограничений. Выборочные рубки ориентированы на постоянство лесопользования и должны применяться в разновозрастных высокопроизводительных насаждениях.

Интенсивно-выборочные рубки (интенсивностью 40-50%) выдержали проверку в качестве промышленной альтернативы сплошным рубкам в раз-

новозрастных хвойных насаждениях. Они позволяют брать лишь половину запаса, но зато концентрированно и без длительного срока примыкания, что облегчает транспортное освоение территории и эксплуатацию лесов. При этих рубках периодически вырубается обычно 20-30 % общего числа деревьев, и площадь постоянно находится под лесом. Расчетный период восстановления запаса при интенсивности рубки 40-50 % составляет для насаждений III класса бонитета, при количестве сохраненных деревьев не менее 300-400 шт./га – 30-50 лет, что и определяет срок повторяемости интенсивно - выборочной рубки.

Добровольно-выборочные рубки применяют в древостоях на хорошо дренированных почвах, в лесах зеленых зон, водоохраных и почвозащитных лесах. Это рубки высокоплотных хозяйств с развитой дорожно-транспортной сетью. При этом виде рубок древесину вырубает с интенсивностью до 30% по запасу.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки и выявления оптимальных вариантов рубок, отработки рациональных технологических приемов разработки лесосек при использовании различных механизмов в Большемурутинском лесхозе были проведены опытно-производственные рубки главного пользования. Разработка опытных лесосек осуществлялась в 1979 году в темнохвойных насаждениях с пихтой и елью с применением трелевочного трактора ТТ-4 и бензопилы МП-5 "Урал". За базовую была принята технология разработки лесосек «методом узких лент».

Назначенный в рубку древостой характеризовался высокими показателями запаса древесины (в

среднем около 400 м³/га), полнотой 1,1, средней производительностью - III классом бонитета, наличием сухостоя 9,8-13,5 %. В первом ярусе преобладали ель (200-220 лет) и пихта (160-180 лет). Второй ярус представлен пихтой (90-110 лет) с участием ели (120-140 лет). В подросте - пихта в количестве 3-4 тыс. шт/га с небольшим участием ели и единичными экземплярами кедра. Естественное возобновление до рубки на участках было представлено пихтой (80 %), елью (20 %) и кедром. Подрост относительно равномерно распределен по площади лесосеки, встречаемость - 87 %. Всходы и самосев приурочены к старому валежнику, что и определяет неравномерность распределения их по площади. На средний и крупный подрост (20-40-летнего возраста) приходится около 2 тыс. шт/га (Иванов, 1981).

Подлесок представлен спиреей средней, малиной, волчьим лыком, шиповником и красной смородиной. Средняя высота 100-250 см, сомкнутость - 0,2-0,3. Размещение подлеска на площади куртинное, ясно выражена приуроченность к окнам в древесном пологе и к микропонижениям.

Живой напочвенный покров представлен 50 видами, из которых наиболее распространены - осочка (*Carex macroura*), вейник (*Calamagrostis arundinacea*), борец высокий (*Aconitum septentrionale*), хвощ луговой (*Equisetum pratense*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), кислица (*Oxalis acetosella*), мителла (*Mitella nuda*), майник (*Maianthemum bifolium*), звездчатка (*Stellaria bungeana*). Средняя высота преобладающего яруса около 40 см, общее проективное покрытие 70-80 %. В куртинах пихтового молодняка и подроста, а также на валежнике - зеленые мхи. Почвы - серые лесные глееватые со вторым гумусовым горизонтом сезонно-длительно-мерзлотные, влажные, слабо дренированные.

С целью исследования динамики восстановления после проведения выборочных рубок проводились повторные учеты в 1980, 1985, 1995 и 2000 годах. Основная проблема, с которой сталкивается исследователь при изучении этих процессов, связана с их большой продолжительностью во времени. Один из способов ее решения - использование методов математического моделирования. Сложность процессов роста, конкуренции и отпада обусловила возникновение множества подходов к их описанию. К первому можно отнести регрессионные уравнения связи различных характеристик деревьев и древостоев. Как правило, эти связи формальные и не рассматривают механизмы исследуемого процесса. С другой стороны, есть работы, направленные на выявление этих механизмов (Ek and Monserud 1979; Slatkin and Anderson 1984; Борисов, Иванов и Кузьмичев 1989; Friend, Shugart and Running 1993).

Эффективным инструментом может выступить имитационное моделирование роста деревьев в древостое, учитывающее характеристики отдельных особей, их пространственное размещение и

конкурентные отношения. В экологическом плане больший интерес представляют модели, в которых рассматривается конкуренция за те или иные ресурсы. Эти работы в том или ином виде используют уравнение

$$\frac{dx}{dt} = kx(\lambda - x) + dx \quad (1)$$

где λ - ресурс; d - смертность. Галицкий, моделируя динамику биомассы, описывает конкурентные отношения через ресурс (Галицкий 1985). С этой целью он определяет "соседей" и делит ресурс между ними, вычисляя для каждого дерева площадь роста k . Уравнение (1) в этом случае модифицируется к виду:

$$\frac{dx}{dt} = k(t) \frac{dx_f}{dt} (\alpha x^\beta + x / x_f)^\gamma - \alpha x^k \quad (2)$$

где x - биомасса; $x_f(t)$ - динамика биомассы свободно растущего дерева. Аналогичное уравнение использовалось для описания роста отдельных особей в ценозе (Борисов и др. 1996, Koocher et. all 1996).

В предлагаемой модели описывается динамика прироста по диаметру ствола в зависимости от взаимных размеров взаимодействующих особей и расстояний между ними. Уравнение роста i -го дерева записывается как:

$$\frac{dx_i}{dt} = v \frac{x_i}{\langle x \rangle} (R_i - \frac{x_i}{x_m}) \quad (3)$$

где x_i - диаметр ствола i -го дерева; $\langle x \rangle$ - средний диаметр стволов; v - масштабный коэффициент; x_m - максимальный диаметр дерева, зависящий от породы, условий местообитания и т.д.; R_i - описывает конкурентное воздействие на i -е дерево со стороны соседей.

Предполагается, что:

- R_i - безразмерная величина и для свободно растущего дерева, не испытывающего конкурентного влияния, равна единице;

- влияние одного дерева на другое есть функция их размеров и расстояния между ними;

- любое взаимодействие с соседними деревьями уменьшает R_i , а совместное влияние нескольких соседей на данное дерево учитывается в мультипликативной форме.

На основе сделанных предположений R_i можно записать в виде:

$$R_i = \prod_{i \neq j} R_{ij}, \quad R_{ij} = A^{-b_{ij}}, \quad b_{ij} = \begin{cases} < x > \frac{x_j}{x_i} \left(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{r_{\text{int}}} \right), & r_{ij} < r_{\text{int}} \\ 0, & r_{ij} \geq r_{\text{int}} \end{cases}, \quad (4)$$

где Π – произведение по всем соседям i -го дерева; R_{ij} – величина, определяющая конкурентное воздействие j -го дерева на i ; x_i, x_j – диаметры стволов i -го и j -го деревьев соответственно; r_{ij} – расстояние между i -м и j -м деревом; r_{int} – максимальное расстояние конкурентного взаимодействия; A – параметр.

Численность деревьев определяется напряженностью конкурентных отношений, приводящих к отпаду особей. Для определения критерия отпада используются различные подходы (Ek and Monserud 1979; Борисов, Иванов, Кузьмичев 1989). В данной модели принято, что отпад происходит при $dx/dt < 0$. По выполнении этого условия дерево из дальнейшего рассмотрения исключается.

Верификация модели осуществлялась на основе данных контрольной пробной площади. С этой целью в среде Delphi была разработана программа генерации деревьев, вычисления прироста с учетом конкуренции в соответствии с уравнениями (3) и (4) и отпада. Реализации пространственного размещения особей генерировались таким образом, чтобы размещение, густота и распределение стволов по ступеням толщины соответствовали характеристикам пробной площади. Чтобы избежать влияния краевых эффектов, для замыкания границ участка использовалась топология тора.

Следующий этап верификации состоял в подборе параметров модели с тем, чтобы рост особей и отпад происходили так же, как и на контрольной пробной площади. Параметры уравнений определялись с использованием таблиц хода роста, результатов исследований по елово-пихтовым насаждениям и методом имитационного моделирования. Константа x_m в уравнении (3) определяет максимальный диаметр дерева, зависящий от породы и условий местообитания. Величина x_m оценивалась по таблицам хода роста елово-пихтовых насаждений для района исследований, в котором были заложены пробные площади (Справочное пособие ..., 1966).

Параметр A в уравнении (4) влияет на величину прироста и отпад деревьев. Методом имитационного моделирования путем варьирования выбиралось значение A , при котором прирост и отпад в модели соответствовал данным натурных исследований на пробных площадях.

Величина r_{int} в уравнении (4) определяет максимальное расстояние, на котором особи ощущают конкурентное воздействие со стороны соседей. Для елово-пихтовых насаждений в районе исследования основная конкуренция ведется за влагу и минеральные вещества. Поэтому r_{int} определяется развитием и взаимодействием корневой системы особей. Предполагая, что расстояние, на которое распространяется корневая система особи, прямо пропорциональна диаметру ствола, можно записать $r_{\text{int}} = kd_j$, где d_j – диаметр дерева, со стороны которого оце-

нивается конкурентное воздействие. На основании исследования по развитию корневой системы известно, что величина k составляет от 10 до 30. Более точный подбор осуществлялся методом имитационного моделирования путем варьирования k с тем, чтобы добиться наибольшего соответствия динамики роста и отпада деревьев в модели с натурными данными. Поскольку конкурентное взаимодействие особей определяется не только расстоянием между ними, но и их размерами, то при варьировании k динамика роста и отпада контролировались дифференцированно по ступеням толщины. Значение масштабного коэффициента v бралось таким, чтобы среднегодовой прирост деревьев в модели и на пробной площади совпадали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационное моделирование роста елово-пихтовых насаждений включало генерацию размещения особей на площадке 50х50 метров с характеристиками, соответствующими пробным площадям. Параметры уравнений (3) и (4) были определены описанным выше способом и имели следующие значения: $A=7,8$; $x_m=80$ см; $k=20$; $v=0,002$. Пример реализации размещения приведен на рисунке 1. С шагом в 1 год рассчитывался прирост и выявлялись деревья, ушедшие в отпад. Моделирование показало, что со временем накапливается систематическое завышение числа деревьев больших ступеней толщины (диаметром более 16 см). Это завышение объясняется наличием ветровала, который не учитывался в модели. Оценки ветровала на пробных площадях показали, что ежегодный вывал деревьев составляет около 2 % по запасу. В связи с этим в модель был введен блок, отвечающий за ветровал. В этом блоке для всех деревьев с диаметром ствола более 16 см задается вероятность отпада, которая повышается от 0 для $d_{1,3} = 16$ см до максимального значения для $d_{1,3} = x_m$. Величина максимальной вероятности отпада бралась такой, чтобы ежегодный вывал деревьев не превышал 2 %. После введения в модель блока, отвечающего за ветровал, распределение по ступеням толщины в модели стало соответствовать данным натурных обследований.

Процессы возобновления играют важную роль в динамике древостоя и их учет необходим при изучении популяций на больших временных интервалах. Эти процессы нашли свое отражение в программе имитационного моделирования и возложены на соответствующий блок, обеспечивающий генерацию деревьев 1-й ступени толщины (4 см) в количестве, соответствующем генерации подроста на пробных площадях. При моделировании учитывалось, что новые особи заселяют в первую очередь прогалы, возникающие после отпада и вывала деревьев.

С помощью данной модели был изучен процесс восстановления древостоя после выборочных рубок. На одной из пробных площадей была произведена выборочная рубка с изъятием деревьев в объеме 30% от общего запаса. Как отмечалось выше, при таких рубках участок остается постоянно

покрытым лесом и расчетный период восстановления запаса для насаждений III класса бонитета составляет 30-50 лет. Повторные обследования на этой пробной площади проводились периодически на протяжении 20 лет. Этот режим рубок был реализован в рамках данной модели. Достоинством

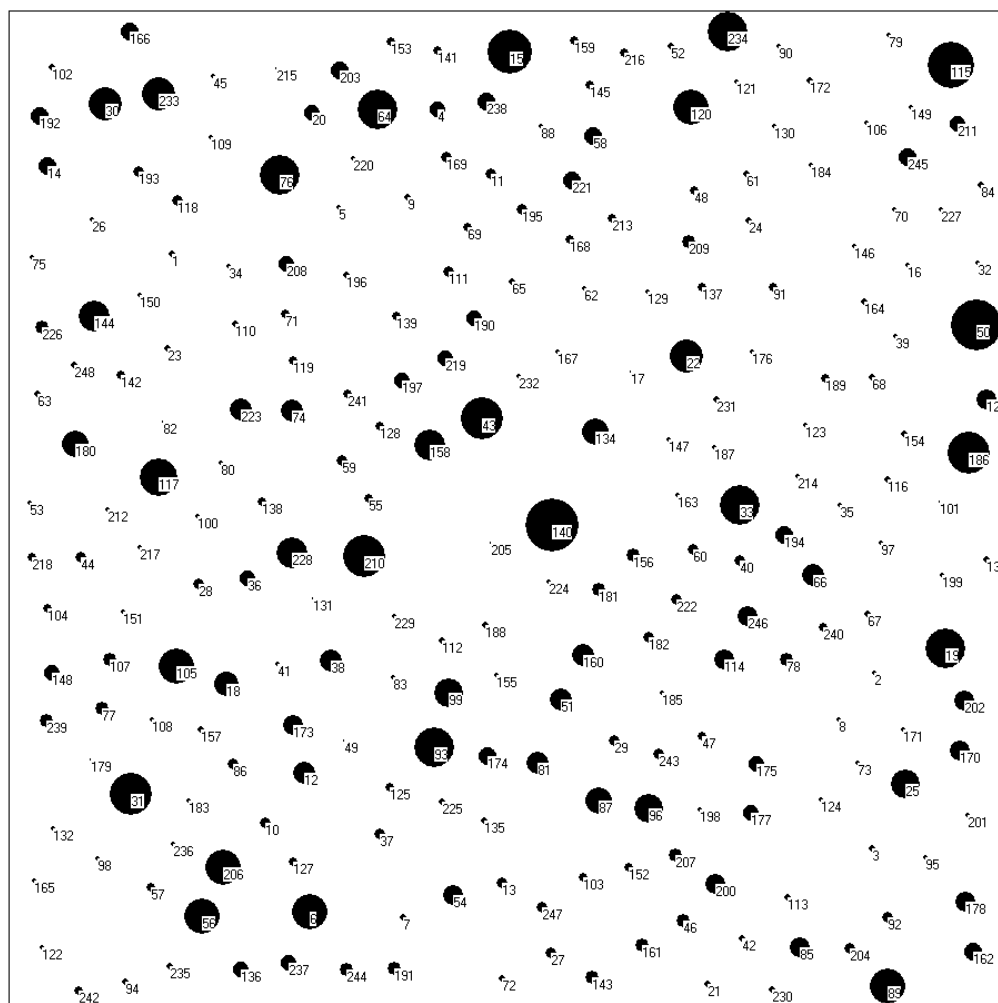


Рисунок 1 – Пример моделирования размещения деревьев. Масштаб отображения стволов увеличен

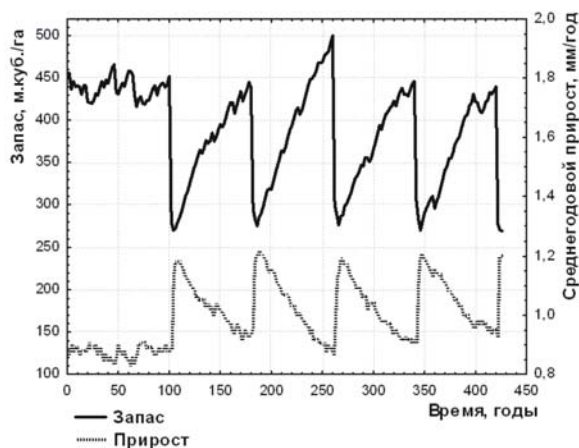


Рисунок 2 – Динамика запаса и прироста для рубок с периодом 80 лет

имитационного моделирования является то, что этот метод позволяет реализовать различные сцена-

рии и проследить их динамику на значительных временных интервалах. Были смоделированы выборочные рубки в объеме 30 % от общего запаса с интервалом в 80 и 40 лет. Период моделирования от 0 до 100 лет соответствует стационарному состоянию древостоя (рис. 2 и 3). В 100 лет произведено

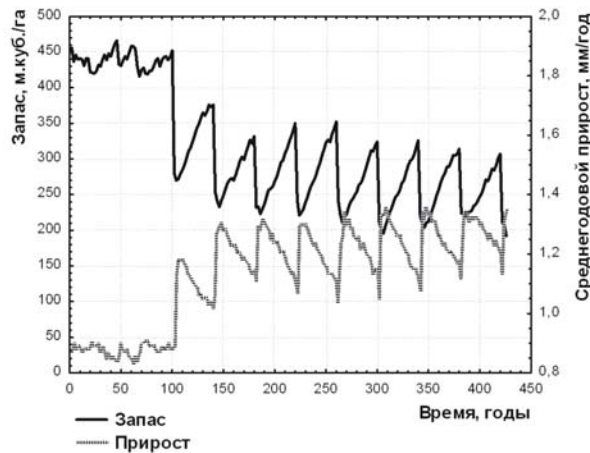


Рисунок 3 – Динамика запаса и прироста для рубок с периодом 40 лет

изъятие деревьев, начиная с максимального диаметра и вплоть до размера, обеспечившего 30 % по запасу. Прежнее значение запаса древесины достигается через 80 лет (рис. 2). Среднегодовой прирост после рубки увеличивается благодаря перераспределению освободившегося ресурса между оставшимися особями и ослаблению конкурентного воздействия со стороны более крупных особей. Прежние значения среднегодовой прироста также достигаются через 80 лет. Проведенный анализ данных среднегодового радиального прироста после рубки показал хорошее соответствие результатов моделирования и измерений на контрольной пробной площади (рис. 4) и подтверждает сказанное выше. В случае уменьшения периода рубок до 40 лет (рис. 3), при неизменном проценте изъятия древесины при каждой рубке, за 40 лет не происходит восстановления запаса до прежнего уровня и его величина перед рубкой становится все меньше. Динамика среднегодового прироста также говорит о том, что при периодичности рубок 40 лет структура древостоя не восстанавливается до первоначального состояния и перераспределение освободившегося ресурса выражается в тенденции к увеличению среднегодового прироста от рубки к рубке.

Важной характеристикой структуры древостоя является распределение по ступеням толщины диаметров стволов на участке. Анализ этого распределения дает важную информацию о динамике восстановления древостоя после рубок. При проведении 4-х рубок с периодичностью 80 лет, т.е. через 320 лет, (рис. 5) древостой имеет распределение по ступеням роста близкое к тому, что было перед рубками.

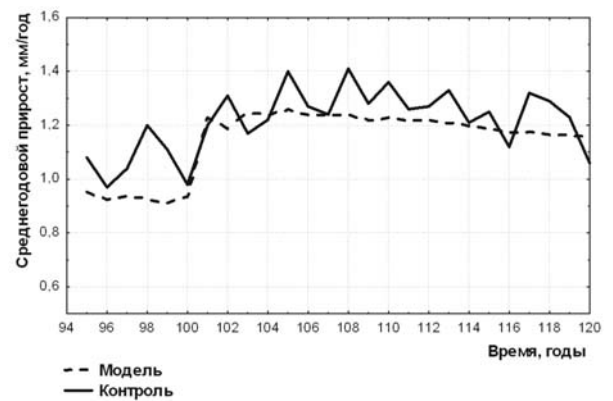


Рисунок 4 – Среднегодовой прирост после выборочной рубки

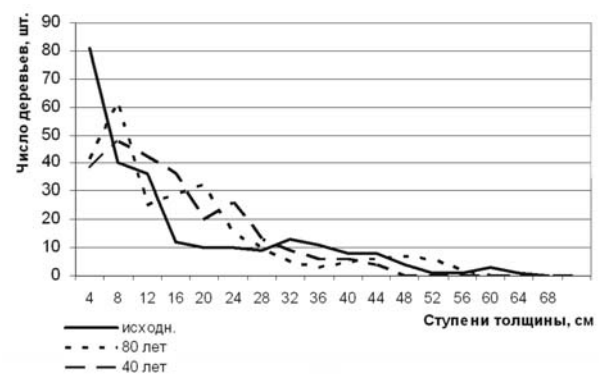


Рисунок 5 – Распределение по ступеням толщины диаметров ствола перед рубками и через 320 лет при рубках с периодом 80 и 40 лет

В то же время при проведении рубок с периодичностью в 40 лет по прошествии того же периода времени существуют заметные изменения в распределении по ступеням роста: отсутствуют деревья диаметром более 44 см, а число деревьев с малыми диаметрами возрастает. Характеристики рубок, приведенные в таблицах 1 и 2, также говорят о том, что при периодичности рубок 40 лет структура древостоя не успевает прийти к прежнему виду и для того, чтобы изымать 30 % по запасу, приходится с каждой рубкой производить удаление деревьев со все меньшим диаметром. Результаты моделирования показывают, что объем древесины, вырубаемой через каждые 40 лет меньше, чем при рубках через 80 лет, но общий объем изъятной древесины за период 320 лет в первом случае больше, чем во втором.

Таблица 1 – Характеристика рубок с периодом 80 лет

Период, годы	Запас перед рубкой, м ³ /га	Изъято, м ³ /га	Минимальный диаметр изъятых деревьев, см
0	451	133	51
80	439	129	47
160	500	190	45
240	446	128	42
Итого		580	

Таблица 2 Характеристика рубок с периодом 40 лет

Период, годы	Запас перед рубкой, м ³ /га	Изъято, м ³ /га	Минимальный диаметр изъятых деревьев, см
0	451	133	51
40	376	117	47
80	331	94	38
120	350	109	36
160	351	108	37
200	332	107	36
240	326	103	38
Итого		771	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное имитационное моделирование показало, что предложенная модель отражает основные особенности динамики темнохвойных насаждений. Модель дает хорошее совпадение таких характеристик, как густота, запас древесины, распределение по ступеням толщины и прирост с данными натурных обследований на пробных площадях, заложенных в Большемурутинском лесхозе. Динамика восстановления после выборочных рубок также соответствует результатам проведенных периодических обследований. Метод имитационного моделирования является альтернативой экспериментов на больших временных интервалах и в то же время позволяет моделировать развитие древостоя с различными сценариями воздействия на него. Данный подход позволяет обоснованно предлагать оптимальные виды, объемы рубок и их периодичность с учетом конкретных характеристик древостоев и условий их местообитания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Борисов, А.Н. Имитационная модель динамики одно-
возрастных древостоев / А.Н. Борисов, В.А. Иванов,
В.В. Кузьмичев // Лесная таксация и лесоустройство,

- Красноярск, КПИ, 1989, с. 20-25.
 Валяев, В.Н. Выборочные и сплошнолесосечные рубки в Карелии (Сравнительная продуктивность) / В.Н. Валяев, Петрозаводск: Карелия, 1984. - 64 с.
 Галицкий, В.В. Горизонтальная структура и динамика одновозрастного растительного сообщества. Численное моделирование / В.В. Галицкий // Математическое моделирование биогеоценотических процессов. - М.: Наука, 1985. - С. 59-70
 Иванов, В.В. Выборочные рубки в равнинных темнохвойных лесах... Информационный листок № 356-81 ЦБНТИ.1981. - 2с.
 Имитационная модель одновозрастного древостоя как полигон для обратных задач дендрохронологии / Борисов А.Н. [и др.]. // В сб.тез. III-ей междунар. конф. Математические проблемы экологии (МАПЭК-96) - Новосибирск. - 2-4 августа 1996. - С.67.
 Итоги экспериментальных работ в лесной опытной даче ТСХА за 1862-1962 г. - Москва, 1964. - 518 с.
 Козловский, В.Б. Ход роста основных лесобразующих пород СССР / В.Б. Козловский, В.М. Павлов. - М.: Лесная пром-ть, 1967, 327 с.
 Кузьмичев, В.В. Закономерности роста древостоев / В.В. Кузьмичев. - Новосибирск: Наука, 1977. - 159 с.
 Морозов, И.Р. Первая книга о лесе / И.Р. Морозов. - Новая деревня, 1928. - 45 с.
 Справочное пособие по таксации и устройству лесов Сибири. - Красноярск, 1966. - 378 с.
 Ek, A.R. 1979 Performance and comparison of stand growth models based on individual tree and diameter-class growth / A.R. Ek, R.A. Monserud, // Canadian Journal of Forestry Research 9. p. 231-244.
 Friend, A.D., Shugart, H.H. and Running S.W. 1993 A physiology-based gap model of forest dynamics. Ecology 74 (3): p. 792-797
 Koocher A.A., Kofman G.B., Borisov A.N., Dachkovskaj I.D., Gurevich M.Y. Modelling and simulation of a dendrochronological test site in: Tree Rings and Humaniti. Ed.by Dean et al., Radiocarbon 1996 p. 803-812
 Slatkin, M. and Anderson, D.J. 1984 A model of competition for space. Ecology 65(6): p. 1840-1845.

Поступила в редакцию 17 декабря 2007 г.
 Принята к печати 16 мая 2008 г.