

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КЕДРОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ВОСТОЧНОГО САЯНА

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE DYNAMICS OF CEDAR STANDS IN THE EASTERN SAYAN

I. Briykhonov

Summary. The article presents the dynamics of cedar stands of the Eastern Sayan. A simulation model is proposed that describes the process of growth in trunk diameter, taking into account the habitat conditions, the distance to neighbors and their mutual sizes. The model was verified based on the field data of the sample areas of cedar stands. Various scenarios of selective logging are modeled. The developed model allows us to describe the dynamics of cedar stands and reasonably suggest the optimal types, volumes of logging and their frequency, taking into account the specific characteristics of stands and habitat conditions.

Keywords: simulation model, cedar stands, Eastern Sayan.

Брюханов Игорь Иванович

Аспирант, Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН
igor_i_b@mail.ru

Аннотация. В статье представлена динамика древостоев кедра Восточного Саяна. Предложена имитационная модель, описывающая процесс роста в зависимости от диаметра ствола с учетом условий обитания, удаленности от соседей и их взаимных размеров. Верификация модели проведена на натуральных данных пробных площадей кедровых древостоев. Были смоделированы различные сценарии выборочного забора. Разработанная модель позволяет описать динамику кедровых древостоев и обоснованно предложить оптимальные виды, объемы убоя и их периодичность с учетом специфики древостоев и условий обитания.

Ключевые слова: имитационная модель, кедровые древостои, Восточный Саян.

Одной из мер, обеспечивающих значительное удовлетворение потребностей лесного хозяйства в кедровой древесине, обеспечение лесовосстановления без естественных изменений видов и сохранение различных полезных функций лесов, являются модели динамики популяций. Они наиболее соответствуют природе кедровых лесов разных возрастов, и их результаты зависят от правильной и грамотной реализации [1].

Они работают только при наличии хорошо подготовленных рабочих, опытного труда, когда заготовка осуществляется хозяйственными средствами в лесном хозяйстве.

Естественное возобновление лесов — это динамичный процесс, и его успех зависит от типа леса, структуры насаждения и биологических особенностей древесных пород.

Этот процесс, особенно при предшествующем использовании отрастания, значительно сокращает время произрастания лесов, объем работ и средств по сравнению с тем, и именно насаждения с самыми высокими наследственными свойствами, которые формируются в процессе регенерации сил природы, имеют особенно важное значение для роста леса. в ле-

соустройстве в бореальных условиях, где происходит разграничение лесной территории на зимнюю и летнюю зоны рубок. Причем структура и интенсивность восстановления различны даже для одной породы, на убое, под навесом или под навесом.

Появление подростка под пологом леса, его выживание, рост и способность формировать новое поколение во многом определяются формирующей ролью материнского лесного древостоя и именно его полнотой, составом, возрастом, что, в свою очередь, влияет на развитие и силу загробной жизни, эти другие факторы тесно связаны не только друг с другом, но и с почвами, климатом, влияющими на внешний вид леса.

По мнению многих исследователей, основными особенностями кедра сибирского, обеспечивающими его сосуществование и даже доминирующее положение в древостоях, являются следующие.

1. активная жизнедеятельность сибирского кедра, превосходящая жизнедеятельность других видов деревьев. Чем реже изменение поколений, тем стабильнее положение вида в фитоценозе;
2. широкая экологическая распространенность сибирского кедра с учетом почвенно-климатических и гидрологических условий;

3. возрастная существенная пластичность сибирского кедра по отношению к важнейшим факторам окружающей среды, что выражается в том, что в первые годы жизни подросток способен переносить достаточно сильное затенение. С возрастом сосна сибирского кедра становится более светолюбивой;
4. способность кедрового подростка в первые годы жизни переносить недостаток света не является наследственным свойством. Это подтверждается массовыми наблюдениями за выращиванием посадочного материала в питомниках, где он успешно растет с первых дней жизни при ярком солнечном свете [6].

Кроме того, сибирская кедровая сосна может появиться под пологом не только из древостоев материнских деревьев.

Так, в сосняках подлеска кедровых древостоев она хорошо растет и развивается как на Урале, так и на западно-Сибирских равнинах, в восточносибирских сосняках и в низинных сосняках Саянских гор, до 1000 шт/га.

Под сенью средних и низких насаждений в Саянском районе находится до 1000 шт/га образцов кедра сибирского в возрасте от 3 до 80 лет. Кедровые деревья высотой до 12 м растут в верхнем пологом соснового леса.

По мнению Р.С. Хамитовой, С.А. Корчаговой, Д.М. Адая, восстановление кедровой древесины под пологом сосновых и березовых лесов является типичным явлением восточных саянских лесов [5].

Кедр сибирский подростковая сосна растет под пологом осинового и березового насаждений. Березовые и осинового леса, образовавшиеся в результате изменений, рассматриваются некоторыми кедровыми исследованиями как потенциальные кедровые насаждения при наличии достоверного количества кедров под их пологом.

Древесина кедра Восточного Саяна, отнесенная к рубкам, характеризовалась высокими показателями запаса древесины (в среднем около 400 м/га), полнотой 1,1, средним III классом бонитировки продуктивности, 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 подростковом возрасте пихта в количестве 3–4 тыс. шт. / га с небольшой долей ели и уникальными экземплярами кедра. Естественное восстановление до рубок на участках было представлено пихтой (80%), елью (20%) и кедром.

Подросток относительно равномерно распределен по площади леса, частота встречаемости составляет 87%. Всходы и самосев приурочены к старому валежнику, что определяет неравномерность их распределения по площади. Средние и крупные подростки (20–40 лет) составляют около 2000 шт/га [3].

Подлесок представлен спиреями среднего размера, малиной, волчьей, дикой розой и красной смолой. Средняя высота-100–250 см, близость-0,2–0,3. Размещение древостоя на площади Восточного Саяна, оно явно ограничено окнами в сени деревьев и микро-впадинами.

Живой растительный покров представлен 50 видами, наиболее распространенными из которых являются:

- ◆ осока (осока macrourea);
- ◆ вейник (*Calamagrostis arundi — nacea*);
- ◆ агрил ясеня (*Aconitum North*);
- ◆ луговой хвощ (*Equisetum pratense*);
- ◆ лесной хвощ (*Equisetum sylvaticum*);
- ◆ кислое яблоко (*Oxalis acetosella*);
- ◆ мителла (*Mitella nuda*);
- ◆ майберри (*Maianthemum bifolium*);
- ◆ *stellaria bungeana*.

Средняя высота преобладающего уровня около 40 см, общий проективный охват-70–80%. Есть зеленые мхи в курганах молодого роста пихты и подлеска, а также на мертвой древесине. Почвы-серые глееватые леса со вторым горизонтом многолетней вечной мерзлоты, влажные, плохо дренированные.

Для изучения динамики восстановления, после выборочной эксплуатации в 2005, 2010, 2015 и 2020 годах, были проведены повторные записи.

Основная проблема, с которой сталкивается исследователь при изучении этих процессов, связана с их длительностью во времени. Один из способов его решения-использовать методы математического моделирования. Сложность процессов роста, конкуренции и упадка привела к появлению многих подходов к их описанию.

Первая включает в себя регрессионные уравнения для соотношения различных характеристик кедров и стоянок деревьев. Как правило, эти связи формальны и не учитывают механизмы рассматриваемого процесса. С другой стороны, ведется работа по выявлению этих механизмов [4].

Эффективным инструментом может быть моделирование роста деревьев в древесине с учетом осо-

бенностей отдельных особей, их пространственного расположения и конкурентных отношений. С экологической точки зрения более интересны модели, связанные с конкуренцией за определенные ресурсы. В этих работах в той или иной форме используется уравнение:

$$dx/dt = kx(\lambda - x) + dx \quad (1)$$

где X — ресурс;
 λ — смертность.

Дебков Н.М., Покляцкий Д.А. и Паршина В.В.Г., моделируя динамику биомассы, описывает конкурентные отношения через ресурс. С этой целью он определяет соседей и делит ресурс между ними, вычисляя для каждого дерева площадь роста.

Уравнение (1) в этом случае модифицируется к виду:

$$dx/dt = k(t)dx/dt(ax^a + x/x_j)^r - ax^k \quad (2)$$

где x — биомасса;

$x_f(t)$ — динамика биомассы свободно растущего дерева. Аналогичное уравнение использовалось для описания роста отдельных особей в ценозе [2].

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:

$$dx_i / dt = v^*x_i / x (R_i - x_i / x_m) \quad (3)$$

где x_i — диаметр ствола i -го дерева;

x — 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:

- ♦ значение безразмерное и для свободно растущего дерева, не испытывающего конкурентного влияния, равно;
- ♦ влияние одного дерева на другое зависит от их размера и расстояния между ними;
- ♦ любое взаимодействие с соседними деревьями уменьшает R , а комбинированное влияние нескольких соседей на данное дерево учитывается в мультипликативной форме.

$$x = x_j / x_i (1/r_{ij} - 1/r_{im}); r_{ij} < r_{im}; 0 r_{ij} > = r_{im} \quad (4)$$

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_{im} — максимальное расстояние конкурентного взаимодействия;

A — параметр.

Количество деревьев определяется интенсивностью конкурентных отношений, что приводит к падению особей. Для определения критерия потери используются различные подходы. В этой модели предполагается, что происходит падение при $dx/dt < 0$. При выполнении этого условия дерево исключается из исследования.

Модель была протестирована на основе данных из контрольной области образца. С этой целью мы разработали программу для генерации деревьев, расчета роста с конкуренцией по уравнениям (3) и (4) и падения.

Реализации пространственного размещения особей создавались таким образом, чтобы размещение, плотность и распределение стволов по толщине ступеней соответствовали характеристикам пробной площади. Чтобы избежать влияния граничных эффектов, топология была использована для закрытия границ графа.

Следующим шагом был выбор параметров модели таким образом, чтобы рост и падение особей происходили так же, как и на контрольной пробной площади.

Параметры уравнений определялись с использованием таблиц темпов роста, результатов исследований на кедровых насаждениях и метода имитационного моделирования.

Константа x_m в уравнении (3) определяет максимальный диаметр дерева в зависимости от вида и условий обитания. Величина x_m оценивалась на основе таблиц темпов роста кедрового стелла для исследуемой территории, на которой были заложены пробные площади

Параметр a уравнения (4) влияет на величину роста и падения деревьев.

Используя метод моделирования, значение a выбиралось путем варьирования подъема и падения модели на основе данных полевых исследований пробных площадей.

Величина r_{int} в уравнении (4) определяет максимальное расстояние, на котором индивиды ощущают конкурентное влияние со стороны соседей. Для кедровой древесины в исследуемом районе основной конкуренцией является влага и минеральные вещества.

Поэтому r_{int} определяется развитием и взаимодействием корневой системы особей.

Предполагая, что расстояние, на которое распространяется корневая система особи, прямо пропорционально диаметру ствола, можно записать:

$$r_{int} = kd_j \quad (5)$$

где d_j — диаметр дерева, по которому оценивается конкурентное воздействие.

Исходя из изучения развития корневой системы, известно, что величина K находится в пределах 10–30. Более точный выбор был сделан путем моделирования путем модификации k таким образом, чтобы динамика роста и увядания деревьев была как можно более согласованной в реальной модели данных.

Поскольку конкурентное взаимодействие особей определяется не только расстоянием между ними, но и их размерами, изменение динамики роста и падения контролировалось дифференцированным образом в зависимости от стадий толщины.

Значение масштабного коэффициента v было взято для учета среднегодового прироста деревьев в модели и на тестовом участке Восточный Саян.

Моделирование динамики древостоев кедра Восточного Саяна включало в себя генерацию размещения особей на участке размером 50х50 метров с характеристиками, соответствующими испытательным площадкам. Параметры уравнений (3) и (4) были определены, как описано выше, и имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a &= 7,8; \\ t &= 80 \text{ см}; \\ k &= 20; \\ v &= 0,002. \end{aligned}$$

С шагом в 1 год был рассчитан рост и идентифицированы поваленные деревья. Моделирование показало, что с течением времени накопилось систематическое завышение количества деревьев большой толщины (более 16 см в диаметре).

Это завышение связано с наличием ветра, который не был учтен в модели. Оценки ветра на испытательных

площадях показали, что ежегодное падение деревьев составляло около 2% запаса.

В связи с этим в модель был введен блок, отвечающий за ветер. В этом блоке для всех деревьев с диаметром ствола более 16 см устанавливается вероятность падения, которая идет от 0 для $113 = 16$ см до максимального значения для $113 = T$.

Максимальная вероятность падения была такова, что ежегодное падение деревьев не превышало 2%.

После того, как в модель был введен ответственный за ветер блок, ступенчатое распределение толщины в модели стало соответствовать данным полевых измерений.

Процессы обновления играют важную роль в динамике древостоя и должны учитываться при изучении популяций на больших временных интервалах.

Эти процессы были отражены в программе моделирования и поручены соответствующему подразделению, обеспечивающему генерацию деревьев 1-й ступени толщины (4 см) в количестве, соответствующем поколению подростков на испытательных площадках.

Моделирование учитывало тот факт, что новые особи в основном заселяют дупла, образовавшиеся в результате падения и деревьев.

Эта модель была использована для изучения процесса регенерации древостоя после выборочных рубок. На одном из участков была проведена выборочная пилотировка с удалением деревьев, составляющих до 30% от общего запаса.

Как отмечалось выше, при таких рубках участок остается постоянно покрытым лесом, а расчетный период восстановления для насаждений III класса бонитировки составляет 30–50 лет.

Повторные исследования на этом полигоне проводились периодически в течение 20 лет. Этот метод убоя был реализован в рамках данной модели.

Преимущество моделирования заключается в том, что этот метод позволяет выполнять различные сценарии и строить их динамику на больших временных интервалах.

Образцы, составляющие 30% от общего запаса, моделировались с интервалом в 80 и 40 лет. Период моделирования от 0 до 100 лет соответствует стационарному состоянию дерева.

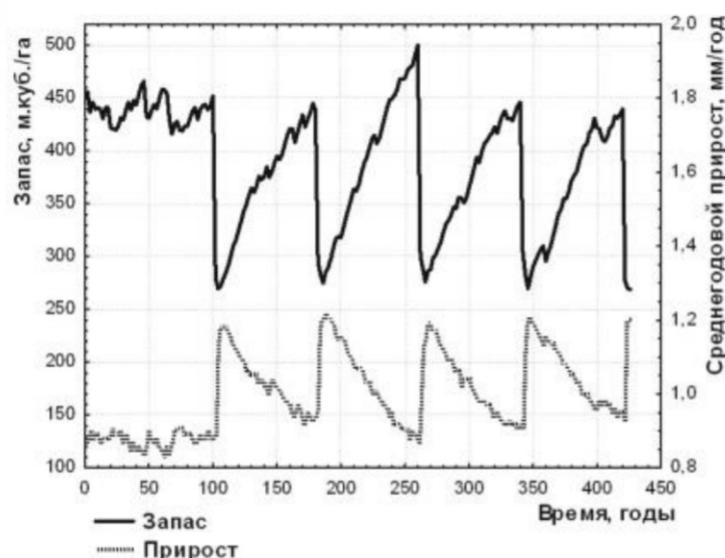


Рис. 1. Динамика запаса и прироста для рубок с периодом 80 лет

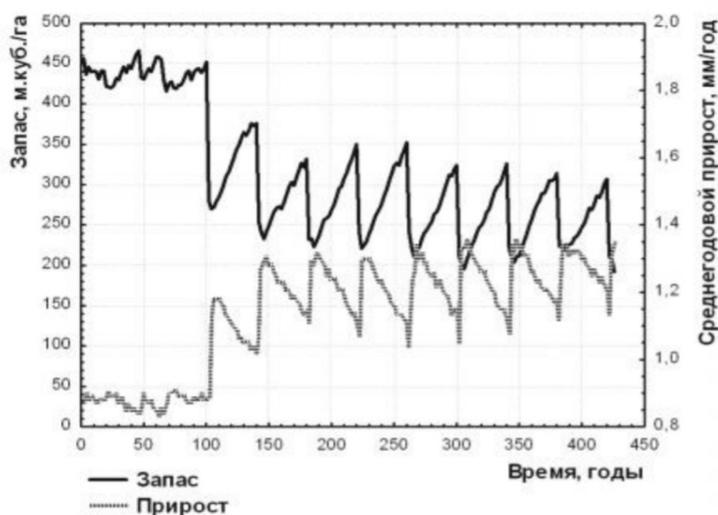


Рис. 2. Динамика запаса и прироста для рубок с периодом 40 лет

За 100 лет были изъяты деревья, начиная от максимального диаметра и до размера, который обеспечивал 30% запаса. Старая стоимость древесного запаса достигается через 80 лет (рис. 1).

Среднегодовые темпы роста после посева увеличиваются за счет перераспределения ресурсов между особями и ослабления конкуренции со стороны влияния более крупных особей.

Прежние значения среднегодового прироста также достигаются после 80 лет. Анализ данных пострегистрационного среднегодового радиального прироста пока-

зал хорошее совпадение результатов моделирования с измерениями эталонной выборки и подтверждает вышеизложенное.

Если срок годности сокращается до 40 лет (Рис. 2), с постоянным процентом усадки древесины при каждой срезке, то в течение 40 лет не происходит восстановления запаса на том же уровне, а его стоимость перед срезкой становится все меньше и меньше.

Динамика среднегодового прироста также свидетельствует о том, что на протяжении более 40 лет периодичность рубок кедрового древостоя не восстанавли-

Таблица 1. Характеристика рубок с периодом 80 лет

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

Таблица 2. Характеристика рубок с периодом 40 лет

Период, годы	Запас перед рубкой, куб. с/га	Изъято, куб. м/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

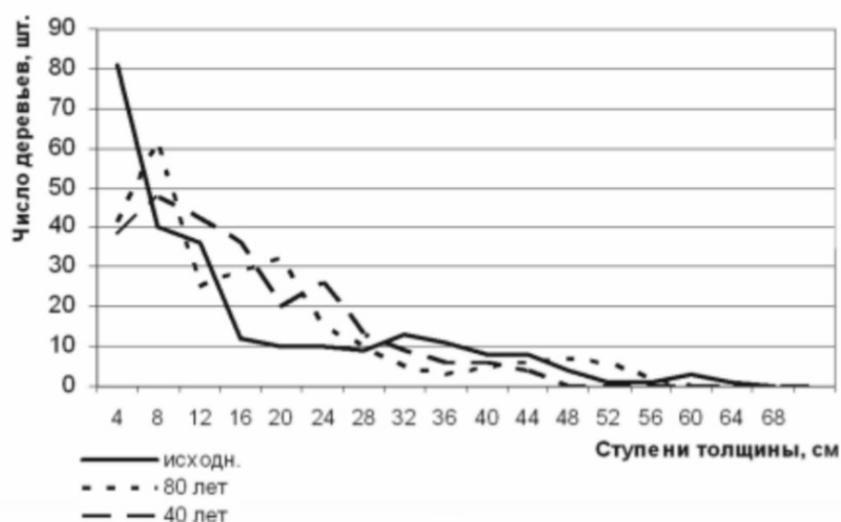


Рис. 3. Распределение по ступеням толщины диаметров ствола перед рубками и через 320 лет при рубках с периодом 80 и 40 лет

ливается в исходное состояние, а выбрасываемый при перераспределении ресурс выражается в тенденции к увеличению среднегодового прироста рубок на рубке.

Важной особенностью строения дерева является ступенчатое распределение толщины по диаметрам стволов на участке. Анализ этого распределения дает важную информацию о динамике регенерации древостоя после рубок.

При выполнении 4 разрезов с периодичностью 80 лет, то есть через 320 лет, (рис. 3) древесина имеет распределение по стадии роста, близкое к таковому до рубки.

В то же время, когда лесозаготовки ведутся с интервалом в 40 лет, по прошествии этого же периода происходят заметные изменения в распределении по стадиям роста: нет деревьев диаметром более 44 см и увеличивается количество деревьев небольших диаметров.

Характеристики черенков, приведенные в таблицах 1 и 2, также указывают на то, что с периодичностью 40 лет посадочная структура не успевает вернуться к прежней форме и убирать 30% запаса, приходится при каждом срезе удалять деревья меньшего диаметра.

Результаты моделирования показывают, что количество древесины, вырубаемой каждые 40 лет, меньше, чем вырубка через 80 лет, но общее количество древесины, заготовленной за 320 лет в первом случае, больше, чем во втором.

Проведенное моделирование показало, что предложенная модель отражает основные характеристики

динамики чернохвостых древостоев. Модель обеспечивает хорошее соответствие таких характеристик, как плотность, запас древесины, ступенчатое распределение толщины и роста, с данными съемок на полигонах Восточного Саяна.

Динамика селективного восстановления после убоя также согласуется с результатами этих периодических обследований. Метод моделирования является альтернативой экспериментам на длинных временных интервалах и позволяет одновременно имитировать разработку стока с различными сценариями воздействия. Такой подход позволяет нам предлагать оптимальные виды, объемы и частоты с учетом специфики мест обитания и условий их обитания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выводцев Н.В. Влияние промышленных рубок на продуктивность кедровых древостоев / Н.В. Выводцев, А.И. Заставский // *Философия современного природопользования в бассейне реки Амур*. — 2020. — С. 28–30.
2. Дебков Н.М. Оценка состояния потенциальных кедровников средней тайги Западной Сибири / Н.М. Дебков, Д.А. Покляцкий, В.В.Г. Паршина // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. — 2017. — № 221. — С. 52–64.
3. Никитина Н.В. Типологический состав и возобновление кедровых лесов (*pinus sibirica dutour*) на северо-восточной границе ареала / Н.В. Никитина // *Аграрная наука: вызовы и перспективы*. — 2018. — С. 276–280.
4. Рыль Е.А. Результаты работы по интродукции сосны кедровой сибирской в Западной Сибири / Е.А. Рыль, Р.А. Третьякова // *Актуальные проблемы агропромышленного комплекса*. — 2020. — С. 143–145.
5. Хамитов Р.С. Изменчивость урожайности половых типов сосны кедровой сибирской / Р.С. Хамитов, С.А. Корчагов, Д.М. Адаи // *Постулат*. — 2018. — № 10 (36). — С. 20.
6. Хусаинов И.И. Оценка состояния насаждений сосны кедровой сибирской (*pinus sibirica du tour*) в учебно-опытном лесхозе ПГТУ / И.И. Хусаинов // *Инженерные кадры — будущее инновационной экономики России*. — 2018. — № 2. — С. 151–154.

© Брюханов Игорь Иванович (igor_i_b@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»