

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 51-76:630*232.43

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СХЕМЫ ПОСАДКИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

А.Н. Колобов

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,
e-mail: alex_0201@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4974-2323>

В условиях рационального ведения лесного хозяйства создаются специальные искусственные лесонасаждения технически ценных пород, которые должны обладать высокой продуктивностью, что позволит получать наибольший запас выращиваемой древесины. Одним из способов увеличения запаса древесины с единицы площади леса является регулирование начальной густоты и схемы посадки деревьев. Методами имитационного моделирования было показано, что при отсутствии внешних воздействий шахматная схема посадки является оптимальной по сравнению с прямоугольной, обеспечивая больший запас древесины. В реальных условиях существуют риски отмирания отдельных деревьев в результате воздействия случайных внешних факторов, таких как ветровалы, фитофаги. Следовательно, запас древесины, выращиваемой при таких оптимальных схемах посадки, будет существенно ниже по сравнению с полученными расчетными значениями.

В связи с этим возникают задачи, направленные на исследование продуктивности насаждений в зависимости от схемы посадки и интенсивности отмирания деревьев в процессе роста древостоя в результате воздействия случайных внешних факторов. Для решения этих задач использовали имитационную модель динамики древесных сообществ, в которой учитывается пространственное расположение каждого дерева, что позволяет легко имитировать различные схемы лесопосадок, а также удалять часть деревьев на любом шаге моделирования. В результате проведенных вычислительных экспериментов были определены оптимальные значения начальной густоты еловых насаждений для разных схем посадки в зависимости от интенсивности воздействия внешних факторов. Показано, что в случае ежегодного воздействия случайных внешних факторов максимальный запас древесины не зависит от схемы посадки, а определяется начальной густотой посадки. При увеличении интенсивности воздействия для получения максимального запаса густоту посадки также необходимо увеличить.

Ключевые слова: схема посадки, искусственное лесонасаждение, имитационная модель, запас древесины, густота посадки, случайные внешние факторы.

Образец цитирования: Колобов А.Н. Модельный анализ продуктивности еловых насаждений в зависимости от схемы посадки и интенсивности воздействия случайных внешних факторов // Региональные проблемы. 2023. Т. 26, № 4. С. 5–13. DOI: 10.31433/2618-9593-2023-26-4-5-13.

Введение

В условиях рационального ведения лесного хозяйства создаются специальные искусственные лесонасаждения технически ценных пород. Целью создания таких лесных плантаций является сокращение сроков выращивания продукции, по-

вышение ее качества и увеличение выхода с единицы площади [4]. Одним из способов увеличения запаса древесины с единицы площади леса является регулирование начальной густоты и схемы посадки деревьев. Густота посадки и взаимное расположение деревьев влияют на процессы

естественного изреживания древостоя, что в итоге определяет величину запаса древесины заданного диаметра [3]. Поэтому для получения максимального запаса необходимо подобрать оптимальные значения этих параметров.

Исследованию влияния густоты посадки на продуктивность лесонасаждений посвящено достаточно большое количество работ. Например, в обзоре [14] отмечается, что за последние 40 лет наблюдалась тенденция увеличения количества соответствующих публикаций, что, видимо, обусловлено разнообразием видов деревьев и местообитаний. В большинстве работ показано, что плотность посадки оказывает большое влияние на диаметр и объем ствола, это приводит к большей продуктивности насаждений с высокой плотностью, особенно для деревьев, имеющих меньший объем ствола. Другие работы позволили заключить, что экология вида, солнечная радиация, потребность в воде и особенности местности оказывают большее влияние на рост растений, чем плотность посадки. Таким образом, несмотря на большое количество работ в данном направлении, для разработки рекомендаций по увеличению продуктивности искусственных лесонасаждений требуется проведение дополнительных исследований в зависимости от вида деревьев и условий местопроизрастания.

Для нахождения оптимальных схем посадки и густоты насаждений, обеспечивающих максимальный запас древесины, используются методы имитационного моделирования например, [10, 11]. В работах по искусственному лесоразведению для получения наибольшей продуктивности древостоя предлагается использовать квадратные схемы посадки [5, 9]. Методами имитационного моделирования было показано, что при отсутствии внешних воздействий квадратная схема посадки является оптимальной по сравнению с другими схемами [3]. Вычислительные эксперименты проводились в предположении, что отмирание деревьев в процессе роста древостоя происходит только в результате внутривидовой конкуренции, не учитывая воздействие случайных внешних факторов, таких как ветровалы, фитофаги, что в итоге отражается на общем запасе древесины. Например, в работе [8] отмечается тот факт, что из-за потепления климата в хвойных лесах Дальневосточного региона значительно увеличивается урон от вредителей, которые оказывают существенное влияние на текущий древесный отпад. Таким образом, в реальных насаждениях запас древесины, выращиваемой при таких оптимальных схемах

посадки, будет существенно ниже по сравнению с полученными расчетными значениями.

В связи с этим возникают задачи, направленные на исследование продуктивности насаждений в зависимости от схемы посадки и интенсивности отмирания деревьев в процессе роста древостоя в результате воздействия случайных внешних факторов.

Материалы и методы

Для исследования продуктивности искусственных лесонасаждений использовали разработанную ранее имитационную модель пространственно-временной динамики древесных сообществ [15]. В основе построения модели находится индивидуально-ориентированный подход, согласно которому моделирование динамики древостоя складывается из описания роста каждого дерева с учетом его видовых характеристик и локально доступных ресурсов. Деревья размещены на площадке с заданными пространственными координатами и оказывают взаимное влияние друг на друга через конкуренцию за свет (рис. 1). Такой подход позволяет легко имитировать различные схемы лесопосадок, а также удалять часть деревьев на любом шаге моделирования.

Рост дерева описывается следующей системой уравнений, позволяющей вычислять объем, высоту и диаметр ствола на каждом шаге моделирования с учетом влияния конкуренции со стороны рядом стоящих деревьев:

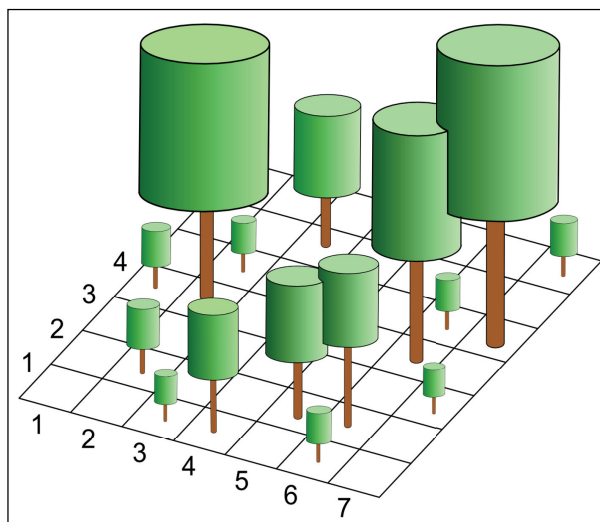


Рис. 1. Размещение деревьев на имитационной решетке

Fig. 1. Arrangement of trees on a simulated grid

$$\frac{dV}{dt} = Pb - cVH, \quad (1)$$

$$P = \left(\frac{P_m \cdot V^{2/3}}{p} \cdot \ln \left(\frac{P_m + a \cdot Q}{P_m + a \cdot Q \cdot \exp(-pV^d)} \right) \right),$$

$$H(t) = c_1(1 - \exp(-c_2(t - t_0)))^{c_3}, \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot H \cdot \alpha \cdot V^{-\gamma}}}, \quad (3)$$

где V, H, D – объем, высота и диаметр ствола дерева, a – начальный наклон кривой продуктивности, P – интенсивность фотосинтеза дерева, P_m – максимальная интенсивность фотосинтеза единицы листовой поверхности, p – коэффициент поглощения света, c – коэффициент пропорциональности расходов энергии на транспорт ассимилятов, Q – доля солнечной радиации, падающей на наружную поверхность кроны, c_1, c_2, c_3 – видоспецифические параметры роста дерева в высоту.

В модели принято, что дерево отмирает, если в результате снижения освещенности, в процессе затенения со стороны рядом стоящих деревьев, интенсивность фотосинтеза становится меньше некоторой пороговой величины.

В качестве объекта исследования рассматривали еловые насаждения, которые имеют широкое распространение на территории Дальневосточного региона и активно используются в качестве сырьевой базы для деревообрабатывающих предприятий. Оценка параметров модели производилась на основе данных таблиц хода

роста нормальных еловых насаждений 2 класса бонитета [7]. На рис. 2 показаны графики роста объема ствола и высоты дерева ели аянской (*Picea jezoensis*), а также приведены значения коэффициентов детерминации и ошибки аппроксимации. Так как модель содержит много параметров, посчитали скорректированный коэффициент детерминации, который составил:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{(n-1)}{(n-k)} =$$

$$= 1 - (1 - 0.99) \cdot \frac{(16-1)}{(16-6)} = 0.985$$

где $R^2=0.99$ – коэффициент детерминации, $n=16$ – количество наблюдений в выборке, $k=6$ – количество параметров в уравнении роста объема ствола дерева.

В итоге получили значение коэффициента детерминации, близкое к единице.

Такое хорошее соответствие между модельными и реальными данными можно объяснить тем, что данные таблиц хода роста, которые использовались для оценки параметров модели, являются усредненными и выровненными. При формировании существующих таблиц ход роста рассматриваемых показателей древостоя (средняя высота, запас насаждения) выравнивался с использованием функции роста Берталанфи [13].

Лесная плантация предназначена для выращивания деловой древесины, которая должна соответствовать определенным требованиям к качеству лесоматериалов. При расчетах возраста

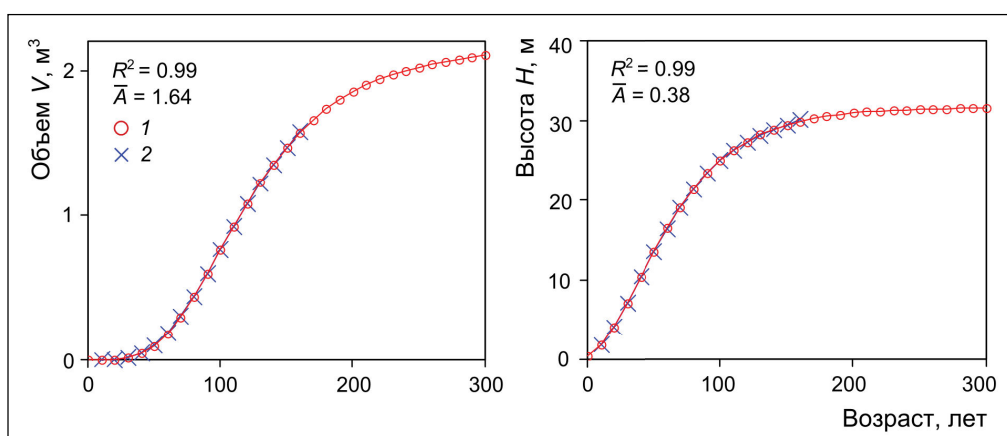


Рис. 2. Графики роста объема и высоты ствола дерева ели аянской
Кружки – реальные данные, крестики – модельные данные

Fig. 2. Graphs of the spruce tree trunk growth in volume and height
Circles – real data, crosses – model data

рубки в эксплуатационных лесах применяется понятие технической спелости древостоя, которое отражает качество и размеры сортимента лесоматериала. Возраст технической спелости древесины, принятый в модели, составляет 120 лет, что соответствует требованиям рубки в еловых насаждениях 2 класса бонитета на территории Дальневосточного региона [6].

Результаты моделирования

На основе имитационного моделирования проведен модельный анализ продуктивности еловых насаждений в зависимости от схемы посадки и интенсивности воздействия случайных внешних факторов. В результате необходимо было определить оптимальные значения начальной густоты еловых насаждений для разных схем посадки, в зависимости от интенсивности отмирания деревьев в процессе роста древостоя. Оптимальной для данной схемы посадки считается плотность, при которой запас древостоя достигает своего максимального значения. Запас древесины считали в момент достижения древостоем возраста технической спелости. Далее, сравнивая полученные максимальные значения, можно определить, какая схема обеспечивает наибольший запас древесины.

Для проведения сравнительного анализа рассматривали шахматную и прямоугольную схемы посадки. Такой выбор обусловлен тем, что квадратная схема посадки при отсутствии внешних воздействий является оптимальной по сравнению с прямоугольной, обеспечивая больший запас древесины [2, 3]. Таким образом можно проследить, как изменяется соотношение максимальных запасов для этих схем посадки и насколько сохраняется свойство оптимальности в зависимости от интенсивности воздействия внешних факторов. В данном случае рассматривали такую прямоугольную схему, в которой ширина междурядий в два раза больше шага посадки (расстояние между

деревьями в ряду). Шахматная схема получается из прямоугольной путем смещения деревьев в нечетных строках наполовину ширины междурядий, как показано на рис. 3. Такое размещение деревьев позволяет производить сравнение величины запасов рассматриваемых схем посадки при одинаковой начальной плотности.

Далее рассчитывали запас древесины возраста технической спелости для каждой схемы посадки, в зависимости от начальной густоты древостоя. Густота посадки для прямоугольной схемы определяется по следующей формуле:

$$ГП=10000/a \cdot b,$$

где a – ширина междурядий (м), b – шаг посадки. В нашем случае $a=2b$. Густоту посадки изменяли, увеличивая шаг посадки на 0.2 м, что соответствует размеру ячеек, на которые разделена площадь моделируемого участка. Ширина междурядий соответственно увеличивалась на 0.4 м.

В результате воздействия случайных внешних факторов происходит ежегодный отпад деревьев, оценки которого принимают различные значения. Например, оценки ветровала в темнохвойных древостоях Красноярского края показали, что ежегодный вывал деревьев составляет около 2.0% по запасу [1]. В коренных ельниках восточноевропейской тайги среднее значение величины текущего древесного отпада, вычисленное по данным пробных площадей, составляет 5.0% от запаса древостоев со стандартным отклонением 2.2% [12].

При проведении вычислительных экспериментов рассматривали два варианта ежегодного изъятия деревьев в размере 1,5% и 5% от общего запаса древесины. Для каждого случая строили несколько сценариев, в которых ежегодное изъятие деревьев производили в течение разного интервала времени, что суммарно определяет степень нарушения структуры насаждения. Коорди-

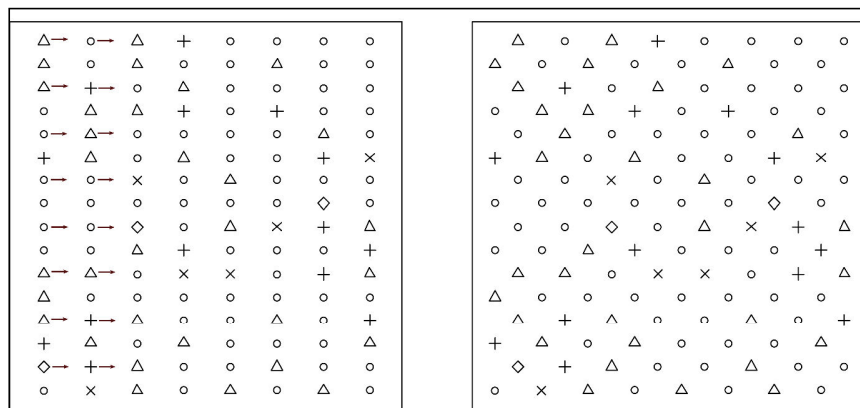


Рис. 3. Прямоугольная и шахматная схемы размещения деревьев на участке

Fig. 3. Rectangular and checkerboard arrangement of trees on the site

наты удаляемых деревьев на участке выбирали случайным образом, используя функцию *random*. Задача моделирования заключалась не в разработке практических рекомендаций, а в проведении сравнительного анализа продуктивности еловых насаждений в зависимости от степени нарушения структуры насаждения.

На рис. 4 показаны графики запаса древесины в зависимости от начальной плотности древостоя при ежегодном изъятии 1,5% деревьев в течение 20, 40, 60 лет от начала моделирования, а также без изъятия. Из графиков видно, что при увеличении периода изъятия, то есть интенсивности воздействия внешних факторов, оптимальная плотность посадки также увеличивается. Для шахматной схемы посадки оптимальная начальная плотность древостоя составила: 740 шт/га без изъятия; 868, 1250 и 1543 шт/га при изъятии в течение 20, 40, 60 лет соответственно.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при увеличении периода изъятия разница между запасами древесины для шахматной и прямоугольной схем посадки при одинако-

вой начальной плотности насаждений уменьшается. Например, разница между максимальными запасами древесины составляет: 98 м³/га без изъятия; 74, 16, 5 м³/га при ежегодном изъятии 1,5% деревьев в течение 20, 40, 60 лет. Если ежегодное изъятие составляет 5% деревьев, то близкие значения максимальных запасов для рассмотренных схем посадки достигаются при продолжительности изъятия 20 лет (рис. 5).

Проведем более детальный анализ, рассмотрим графики динамики запаса для рассматриваемых схем посадки при ежегодном изъятии 1,5% и одинаковой начальной численности деревьев 868 шт./га (рис. 6). Из графиков видно, что без изъятия деревьев процесс самоизреживания для прямоугольной схемы посадки начинается раньше и является более интенсивным, чем для шахматной схемы, что обуславливает меньший запас древесины (рис. 6 а). В случае изъятия части деревьев в процессе роста древостоя интенсивность изреживания уменьшается (рис. 6 б). При ежегодном изъятии деревьев в течение 60 лет от начала моделирования процессы самоизреживания не воз-

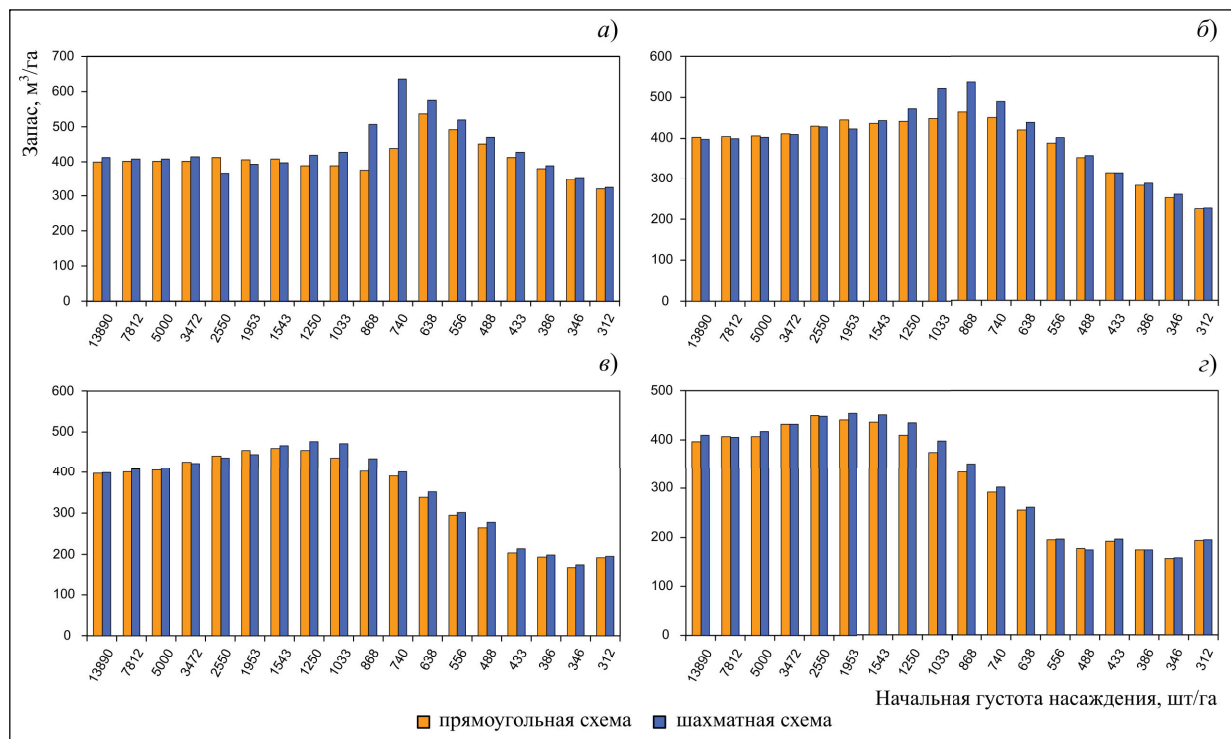


Рис. 4. Запас древесины в зависимости от начальной густоты насаждения:
 а) без изъятия; б, в, г) при ежегодном изъятии 1,5% деревьев от общего запаса в течение 20, 40, 60 лет соответственно

Fig. 4. Timber stock dependent on the initial density of planting:
 a) without tree removal; b, c, d) with an annual 1.5% trees removal from the total stock for 20, 40, 60 years, respectively

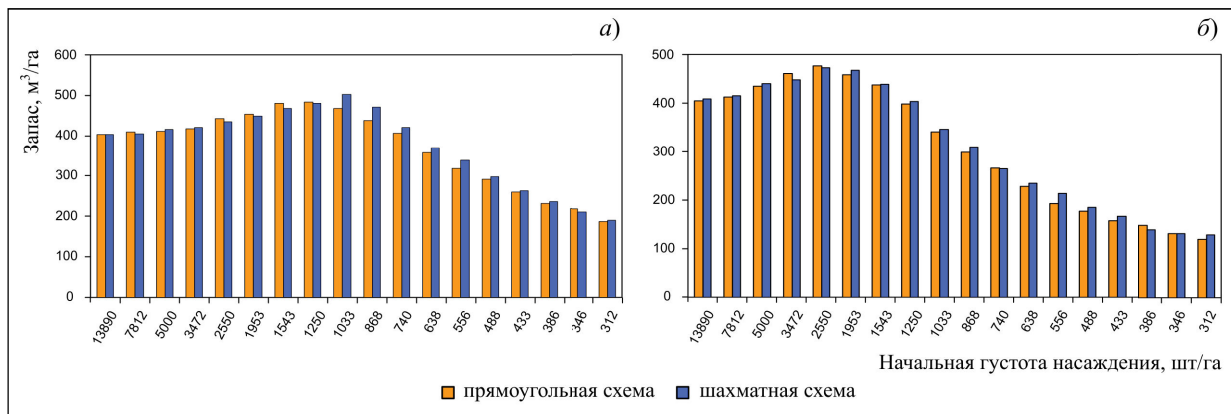


Рис. 5. Запас древесины в зависимости от начальной густоты насаждения при ежегодном изъятии 5% деревьев от общего запаса: а, б) в течение 10, 20 лет соответственно

Fig. 5. Timber stock dependent on the initial density of plantation with the annual removal of 5% trees from the total wood stock: а, б) for 10, 20 years, respectively

никают (рис. 6 в). Численность деревьев при достижении возраста технической спелости в обоих случаях будет одинаковой, обеспечивая близкие значения запасов: 349 и 334 м³/га для шахматной

и прямоугольной схем. Такой эффект объясняется тем, что процесс самоизреживания зависит от плотности и пространственной структуры древостоя, которые изменяются в результате изъятия де-

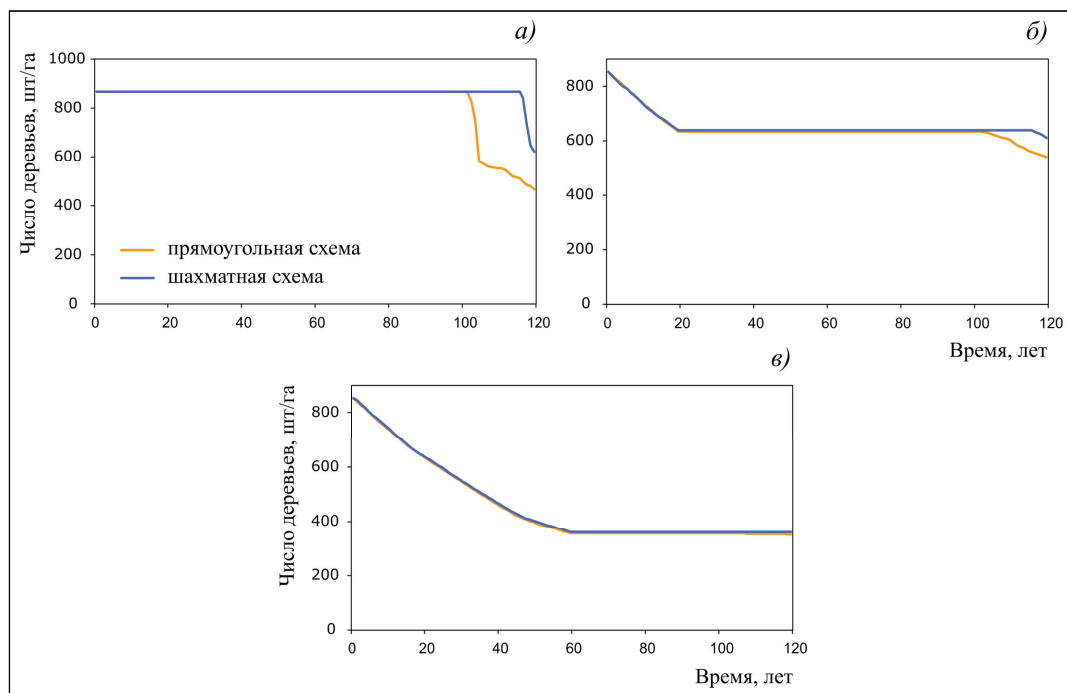
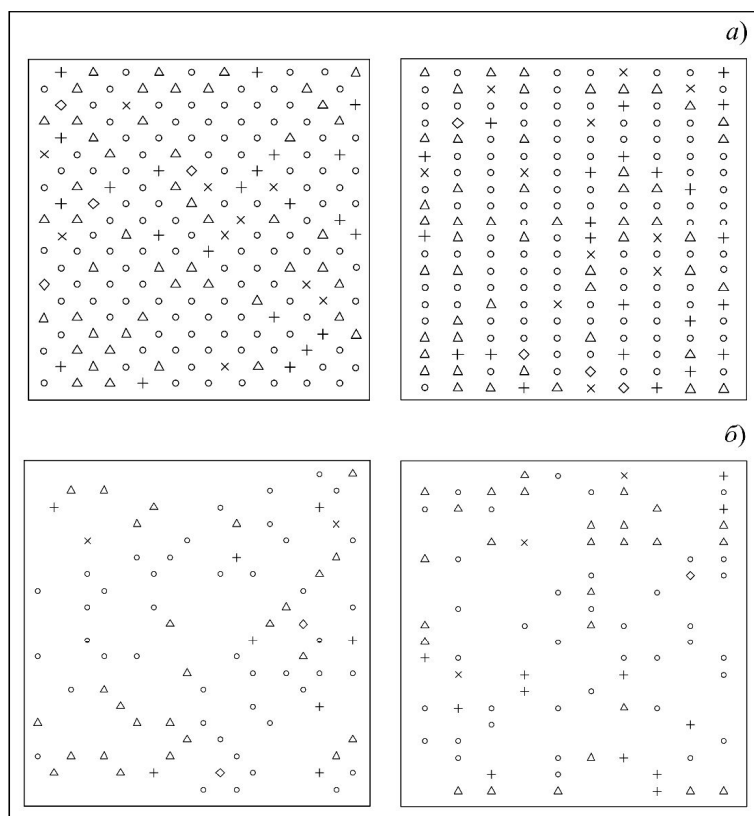


Рис. 6. Динамика запаса для прямоугольной и шахматной схем посадки при одинаковой начальной численности деревьев 868 шт./га: а) без изъятия; б, в) при ежегодном изъятии 1,5% деревьев в течение 20, 60 лет

Fig. 6. Dynamics of stock for rectangular and checkerboard planting schemes with the same initial number of trees 868 pcs./ha: а) without removal; б, с) with 1.5% of trees annual removal for 20, 60 years



**Рис. 7. Прямоугольная и шахматная
схемы посадки:
а) начало моделирования;
б) через 60 лет при ежегодном
изъятии 1,5% деревьев**

**Fig. 7. Rectangular and checkerboard
planting patterns: a) beginning
of modeling; b) after 60 years with
an annual removal of 1.5% of trees**

реьев (рис. 7). Таким образом, при определенной степени нарушения пространственной структуры насаждения в результате внешних воздействий максимальные запасы древесины для разных схем посадки имеют близкие значения.

Заключение

На основе имитационного моделирования проведен модельный анализ продуктивности еловых насаждений в зависимости от схемы посадки и интенсивности отмирания деревьев в процессе роста древостоя. Исследование показало, что при увеличении интенсивности воздействия случайных внешних факторов оптимальная плотность посадки, обеспечивающая максимальный запас древесины, также увеличивается. Результаты вычислительных экспериментов показали, что при ежегодном изъятии 1,5% деревьев от общего запаса в течение 60 лет от начала моделирования максимальные запасы древесины для квадратной и прямоугольной схем посадки имеют близкие значения. Если ежегодное изъятие составляет 5% деревьев, то близкие значения запасов для рассмотренных схем посадки достигаются при продолжительности изъятия 20 лет. Таким образом, при определенной интенсивности воздействия внешних факторов максимальный запас древесины не зависит от схемы посадки, а определяется начальной плотностью древостоя.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Борисов А.Н., Иванов В.В. Имитационное моделирование динамики темнохвойных древостоев при выборочных рубках // Хвойные бореальные зоны. 2008. Т. XXV, № 1–2. С. 135–140.
2. Колобов А.Н. Имитационное моделирование оптимальных схем лесопосадки с учетом воздействия внешних факторов // Региональные проблемы. 2022. Т. 25, № 3. С. 168–170.
3. Колобов А.Н., Фрисман Е.Я. Модельный анализ продуктивности искусственных еловых насаждений при разных схемах посадки // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81, № 3. С. 163–173.
4. Лесная энциклопедия. Т. 2 / под ред. Г.И. Воробьева. М.: Советская энциклопедия, 1986. 631 с.
5. Мерзленко М.Д. Теория и практика искусственного лесовосстановления / М.Д. Мерзленко, Н.А. Бабич. Архангельск: САФУ, 2011. 239 с.
6. Об установлении возрастов рубок: Приказ Рослесхоза № 105 от 09.04.2015 г. (ред. от 02.07.2015) // Кодификация РФ, 2023. URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Rosleshoza-ot-09.04.2015-N-105/> (дата обращения: 02.10.2023).

7. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалев. М.: Колос, 1992. 195 с.
 8. Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А. Мониторинг усыхания хвойных лесонасаждений на Дальнем Востоке – заповедник «Курильский» // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2021. № 59. С. 164–166.
 9. Писаренко А.И. Создание искусственных лесов / А.И. Писаренко, М.Д. Мерзленко. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.
 10. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев // Математическая биология и биоинформатика. 2016. Т. 11, № 2. С. 245–262.
 11. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Шанин В.Н. Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 2. С. 333–343.
 12. Стороженко В.Г. Характеристика древесного отпада в коренных ельниках Восточноевропейской тайги // Лесоведение. 2012. № 3. С. 43–50.
 13. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильссон, Ю.И. Булуй. 2-е изд., доп. М.: Федеральное агентство лесн. хоз-ва, 2008. 886 с.
 14. Gabira M.M., Girona M.M., Desrochers A., Kratz D. et al. The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview // Forest Ecology and Management. 2023. Vol. 534. P. 120882.
 15. Kolobov A.N., Frisman E.Y. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands // Ecological Complexity. 2016. Vol. 27. P. 29–39.
- REFERENCES:
1. Borisov A.N., Ivanov V.V. Simulation modeling of the dynamics of dark coniferous stands during selective felling. *Khvoinye boreal'nye zony*, 2008, vol. 25, no. 1–2, pp. 135–140. (In Russ.).
 2. Kolobov A.N. Simulation modeling of optimal forest planting schemes taking into account the impact of external factors. *Regional'nye problemy*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 168–170. (In Russ.).
 3. Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Modeling approach to the analysis of productivity of artificial spruce stands at different planting schemes. *Zhurnal obshchei biologii*, 2020, vol. 81, no. 3, pp. 163–173. (In Russ.).
 4. *Lesnaya entsiklopediya: vol. 2.* (Forest encyclopedia), G.I. Vorobyova Ed. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1986. 631 p. (In Russ.).
 5. Merzlenko M.D. *Teoriya i praktika iskusstvennogo lesovosstanovleniya* (Theory and practice of artificial reforestation), M.D. Merzlenko, N.A. Babich. Arkhangelsk: NARFU, 2011. 239 p. (In Russ.).
 6. On the establishment of logging ages: Order of the Federal Forestry Agency no. 105 dated 09.04.2015. (ed. from 02.07.2015). *Kodifikatsiya RF*, 2023. Available at: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Rosleshoza-ot-09.04.2015-N-105/> (accessed: 02.10.2023). (In Russ.).
 7. *Obshchesoyuznye normativy dlya taksatsii lesov* (All-Union standards for forest taxation), V.V. Zagreev, V.I. Sukhikh, A.Z. Shvidenko, N.N. Gusev, A.G. Moshkalev. Moscow: Kolos Publ., 1992. 195 p. (In Russ.).
 8. Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A. Monitoring of Coniferous Forest Stands Drying in the Far East- Kurilskiy Natural Reserve. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2021, no. 59, pp. 164–166. (In Russ.).
 9. Pisarenko A.I. *Sozдание iskusstvennykh lesov* (Creation of artificial forests), A.I. Pisarenko, M.D. Merzlenko. Moscow: Agropromizdat Publ., 1990. 270 p. (In Russ.).
 10. Pripulina I.V., Frolova G.G., Bykhovets S.S., Shanin V.N., Lebedev V.G., Shestibratov K.A. Modeling The Productivity of Forest Plantations With the Different Spacing the Trees. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 245–262. (In Russ.).
 11. Pripulina I.V., Frolova G.G., Shanin V.N. Substantiation of Optimum Planting Schemes for Forest Plantations: A Computer Experiment. *Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovanie*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 333–343. (In Russ.).
 12. Storozhenko V.G. Characterization of Current Deadwood and Slash in Natural Spruce Forests of East European Taiga. *Lesovedenie*, 2012, no. 3, pp. 43–50. (In Russ.).
 13. *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod*

Severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy) (Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (standard and reference materials)), A.Z. Shvidenko, D.G. Schepaschenko, S. Nilsson, Yu.I. Buluy. 2-nd ed., supplemented. Moscow: Federal Agency of Forest Management, 2008. 886 p. (In Russ.).

14. Gabira M.M., Girona M.M., Desrochers A., Kratz D. et al. The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview. *Forest Ecology and Management*, 2023, vol. 534, pp. 120882.
15. Kolobov A.N., Frisman E.Y. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands. *Ecological Complexity*, 2016, vol. 27, pp. 29–39.

MODEL ANALYSIS OF THE PLANTATIONS SPRUCE PRODUCTIVITY DEPENDENT ON THE PLANTING SCHEME AND INTENSITY OF RANDOM EXTERNAL FACTORS IMPACT

A.N. Kolobov

With rational forestry management, it is created special artificial forest plantations of high productivity for technically valuable species allowing the largest supply of grown wood. One of the ways to increase the supply of wood per unit of forest area is to regulate the initial density and planting pattern of trees. Using simulation methods, it is shown that in the absence of external influences, a checkerboard planting pattern is an optimal one providing a larger supply of wood as compared to a rectangular pattern. In real conditions, there are risks of dying off for individual trees due to random external factors like gusts of wind and phytophages. Therefore, in real life the supply of wood grown under such optimal planting schemes would be significantly lower as compared to the calculated values obtained.

In this regard, there arise problems aimed at studying the plantings productivity dependent on the planting pattern and the intensity of tree death during the forest stand growth as a result of the random external factors influence. To solve these problems, we used a simulation model of tree communities dynamics, which takes into account the spatial location of each tree, in this way making it easy to simulate various forest planting schemes and remove some trees at any step of modeling. As a result of the computational experiments, the optimal values of spruce plantations initial density have been defined for different planting schemes, dependent on the intensity of the external factors influence. It is shown that at a certain intensity of the external factors impact, the maximum timber stock does not depend on the planting scheme, but is determined by the initial density of the forest stand. When the impact intensity increases, the planting density also needs to be increased, in order to obtain the maximum reserve.

Keywords: *planting scheme, artificial forest plantation, simulation model, wood supply, planting density, influence of external factors.*

Reference: Kolobov A.N. Model analysis of the plantations spruce productivity dependent on the planting scheme and intensity of random external factors impact. *Regional'nye problemy*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 5–13. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2023-26-4-5-13.

Поступила в редакцию 08.11.2023

Принята к публикации 18.12.2023