

УДК 51-76:630\*232.43

## МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ ПОСАДКИ

© 2020 г. А. Н. Колобов<sup>1</sup>, \*, Е. Я. Фрисман<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН  
Ул. Шолом-Алейхема, 4, Биробиджан, 679000 Россия

\*E-mail: alex\_0201@mail.ru

\*\*E-mail: frisman@mail.ru

Поступила в редакцию 23.07.2019 г.

После доработки 21.01.2020 г.

Принята к публикации 18.02.2020 г.

Одним из способов повысить продуктивность искусственного лесонасаждения является регулирование густоты и взаимного расположения деревьев. В связи с этим возникают задачи нахождения оптимальных схем лесопосадки для получения максимального запаса древесины заданного диаметра. На основе разработанной имитационной модели проведен сравнительный анализ продуктивности еловых насаждений при разных схемах посадки. Рассмотрены прямоугольные и квадратные схемы посадки с разной начальной густотой древостоя. Вычислен запас мелкой (диаметр ствола 6–13 см), средней (14–23 см) и крупной (больше 24 см) древесины в зависимости от ширины междурядий и шага посадки деревьев, расположенных на площадке размером 40 × 40 м. При этом подбирая оптимальную схему посадки, учтен тот факт, что саженцы не являются одинаковыми, различаясь по степени конкурентоспособности. Показано, что при одинаковой начальной численности саженцев квадратная схема посадки является оптимальной. Оптимальное расстояние между деревьями для выращивания мелкой, средней и крупной древесины при квадратной схеме посадки соответственно составило: 1.4 × 1.4 м, 2.4 × 2.4 м, 4 × 4 м. Время, за которое еловый древостой достигает заданных качественных характеристик, соответствующих мелкой, средней, крупной древесине, составило 36, 68, 155 лет. Таким образом, показано, что для получения максимального запаса древесины разного класса крупности требуется разная начальная густота насаждения: чем выше класс крупности выращиваемой древесины, тем меньше оптимальная густота посадки.

DOI: 10.31857/S0044459620030045

На сегодняшний день альтернативой лесозаготовок в естественных древостоях является создание искусственных лесных плантаций. Это позволяет получать необходимое количество древесины с заданными качественными характеристиками. Лесная плантация представляет собой участок земли, занятый специальными насаждениями быстрорастущих и технически ценных пород. Целью создания таких плантаций является сокращение сроков выращивания продукции, повышение ее качества и увеличение выхода с единицы площади (Лесная энциклопедия, 1986). Она должна обладать высокой продуктивностью, что позволит получить наибольший запас выращиваемой древесины и, соответственно, максимизировать прибыль. Одним из способов повысить продуктивность насаждения является регулирование густоты посадки и взаимного расположения деревьев. Густота посадки является одним из важнейших показателей, характеризующих количественное и качественное состояние лесокультур (Мерзленко,

Бабич, 2011). Увеличение начальной численности деревьев позволяет увеличить запас древесины, но чем выше густота насаждения, тем сильнее проявляются процессы естественного изреживания в результате конкуренции за ресурсы, что приводит к снижению запаса древесины. В то же время одинаковое число деревьев можно расположить разными способами, что также влияет на распределение ресурсов и, соответственно, процессы изреживания древостоя (Грабарник, 2007; Kolobov, Frisman, 2018). В связи с этим возникают задачи, направленные на разработку оптимальных схем лесопосадки, которые обеспечивают получение максимального запаса древесины с определенными качественными характеристиками, например диаметр ствола.

При создании лесных плантаций применяются разные способы размещения деревьев: квадратный, рядовой, ленточный и др. (Шутов и др., 1984; Fang et al., 1999; Larocque, 1999). В работах по искусственному лесоразведению в качестве

рекомендаций для получения наибольшей продуктивности древостоя предлагается использовать квадратные схемы посадки (Писаренко, Мерзленко, 1990). В то же время методами имитационного моделирования было показано, что, например, в искусственных насаждениях осины и березы размещение деревьев рядами является более продуктивным (Припутина и др., 2016а, б). Таким образом, несмотря на существующие рекомендации по искусственному лесоразведению, требуется более детальный анализ продуктивности насаждений в зависимости от пространственного размещения деревьев, который невозможен без использования средств математического моделирования.

В данной работе методами имитационного моделирования решается задача нахождения оптимального размещения деревьев на участке для получения максимального запаса выращиваемой древесины заданного диаметра.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве плантационной культуры рассматривали ель, которая по степени распространения и хозяйственному значению является одной из преобладающих древесных пород на Дальнем Востоке России и представляет собой крупнейшую сырьевую базу для лесоперерабатывающих предприятий (Корякин, 2010). Для моделирования динамики запаса еловых насаждений при разных схемах посадки использована разработанная ранее имитационная модель пространственно-временной динамики древесных сообществ (Колобов, 2014; Kolobov, Frisman, 2016). Она позволяет проводить вычислительные эксперименты с различными комбинациями видовой и возрастной структуры древостоя, произрастающего на территории с умеренным климатом, где основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем является свет. Используемый в модели индивидуально-ориентированный подход, подразумевающий описание роста каждого дерева в зависимости от его видовой специфики и пространственного расположения в древостое, позволяет легко имитировать различные схемы лесопосадок.

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:

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

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

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

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

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;  $d$  – фрактальная размерность кроны;  $b$  – коэффициент преобразования энергии в прирост объема ствола;  $c$  – коэффициент пропорциональности расходов энергии на транспорт ассимилятов;  $Q$  – доля солнечной радиации, падающей на наружную поверхность кроны;  $c_1, c_2, c_3$  – видоспецифичные параметры роста дерева в высоту;  $t$  – возраст дерева;  $t_0$  – начальный возраст дерева;  $\alpha, \gamma$  – коэффициенты зависимости видового числа от объема ствола. Подробное описание модели роста дерева в условиях конкуренции за свет можно найти в предшествующих работах (Колобов, 2014; Kolobov, Frisman, 2016).

Оценка параметров модели производилась на основе таблиц хода роста нормальных еловых насаждений II класса бонитета (Загребев и др., 1992). Результаты оценки параметров модели приведены в работе Колобова и Фрисмана (Kolobov, Frisman, 2018). На рис. 1 показаны графики роста объема ствола и высоты дерева ели аянской (*Picea jezoensis*), а также приведены значения коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) и ошибки аппроксимации ( $\bar{A}$ ). Для оценки параметров отмирания дерева в результате конкуренции за свет использовали эмпирические данные естественного изреживания одновозрастных еловых древостоев II класса бонитета (Загребев и др., 1992). В модели принято, что дерево отмирает, если в результате снижения освещенности интенсивность фотосинтеза становится меньше некоторой пороговой величины. Это условие записывается в следующем виде:

$$\frac{P(V(t), Q)}{P_0(V_m(t), Q_0)} < n(V_m(t)).$$

Здесь  $P(V(t), Q), P_0(V_m(t), Q_0)$  – интенсивность фотосинтеза кроны дерева (см. уравнение (1)), растущего в условиях затенения ( $Q < 1$ ) и при полном освещении ( $Q_0 = 1$ );  $V(t), V_m(t)$  – текущий и максимально возможный (без затенения,  $Q_0 = 1$ ) в данном возрасте объем ствола дерева;  $t$  – возраст дерева;  $n(V_m(t))$  – пороговая величина отклонения текущей интенсивности фотосинтеза от максимально возможного в данном возрасте значения. В работах Г.П. Карева (Карев, Скоморовский, 1997; Березовская, Карев, 2015) было показано, что для адекватного описания процессов естественного изреживания древостоев необходимо

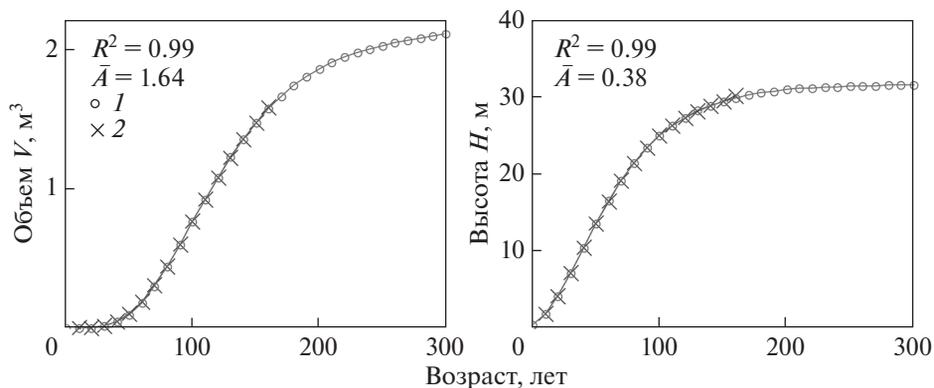


Рис. 1. Графики роста объема ствола ( $V$ ) и высоты ( $H$ ) дерева ели аянской (*Picea jezoensis*). 1 – модельные данные, 2 – эмпирические данные.

учитывать неоднородность насаждения как одного из фундаментальных факторов, определяющих динамику популяций. Неоднородность насаждения заключается в том, что особи не являются идентичными, имея различную вероятность гибели. В модели учитывается тот факт, что саженцы различаются по степени конкурентоспособности, которая в данном случае отражается в разной скорости роста и разном уровне порога освещенности, при котором происходит их отмирание. В результате удовлетворительные соответствия между реальными и модельными данными (рис. 2) были получены при следующем начальном распределении саженцев, расположенных по возрастанию степени конкурентоспособности:  $q_1 = 0.57, q_2 = 0.25, q_3 = 0.11, q_4 = 0.049, q_5 = 0.021$ , где  $q_i$  – доля саженцев от их общего числа на моделируемом участке.

В работе Колобова и Фрисман (Kolobov, Frisman, 2018) было показано, что неоднородность саженцев по степени конкурентоспособности оказывает существенное влияние на процессы естественного изреживания одновозрастных древостоев при регулярном пространственном расположении деревьев. Вычислительные эксперименты показали, что в однородной популяции, когда саженцы являются одинаковыми, при регулярном пространственном расположении деревьев (рис. 3а) в определенный момент времени происходит одновременная гибель насаждения (рис. 4, пунктирная линия). В случае начальной неоднородности саженцев (рис. 3б) изреживание древостоя происходит менее интенсивно (рис. 4, сплошная линия). Таким образом, подбирая оптимальные схемы лесопосадки, необходимо было учитывать тот факт, что саженцы не являются идентичными, имея различную степень конкурентоспособности.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ ПОСАДКИ

На основе разработанной имитационной модели проведен модельный анализ продуктивности еловых насаждений в зависимости от ширины междурядий и шага посадки деревьев. В результате необходимо было определить оптимальные значения параметров размещения лесокультурных посадочных мест для получения максимального запаса мелкой, средней и крупной деловой древесины. Деловая древесина – это части ствола дерева определенных размеров и качества, являющиеся конечным продуктом лесозаготовительного производства или используемые как полуфабрикаты для дальнейшей механической или химической переработки. Диапазон деловой древесины по длине хлыста ограничивается минимально допу-

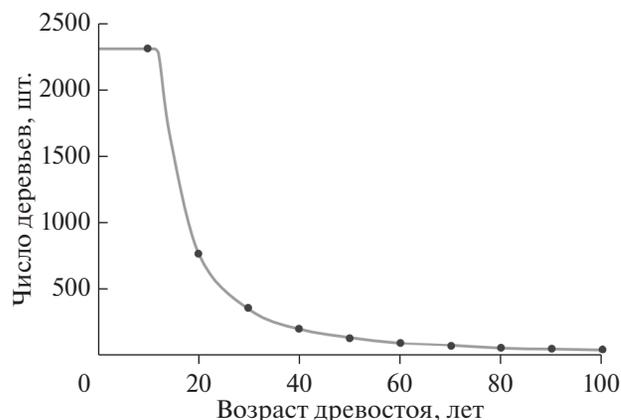
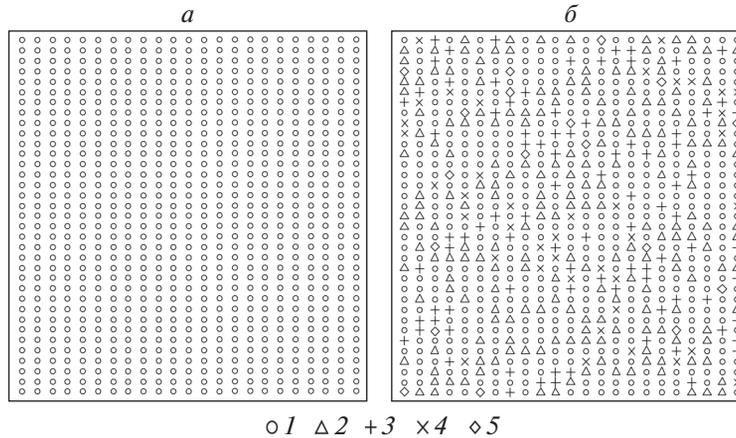


Рис. 2. Модельная реализация процесса естественного изреживания одновозрастного елового древостоя при случайном начальном расположении саженцев, различающихся по степени конкурентоспособности. Точки – реальные данные.



**Рис. 3.** Регулярное начальное расположение саженцев в случае, когда саженцы являются одинаковыми (а) и когда саженцы различаются по степени конкурентоспособности (б). Цифрам соответствуют номера групп деревьев с разной степенью конкурентоспособности.

стимым значением диаметра в верхнем отрезе, равным 6 см. Деловую древесину разделяют на три класса крупности: мелкая древесина, минимальный диаметр ствола которой по длине хлыста находится в диапазоне 6–13 см, средняя – диапазон минимального диаметра 14–24 см, крупная – минимальный диаметр больше 24 см (ГОСТ 17462-84, 2000).

Моделирование динамики елового древостоя осуществляли на участке размером 40 × 40 м. Вычисляли запас мелкой, средней и крупной древесины в зависимости от расстояния между деревьями и, соответственно, начальной густоты насаждения. Густота посадки ( $G_p$ ) связана с параметрами размещения деревьев по следующей хорошо из-

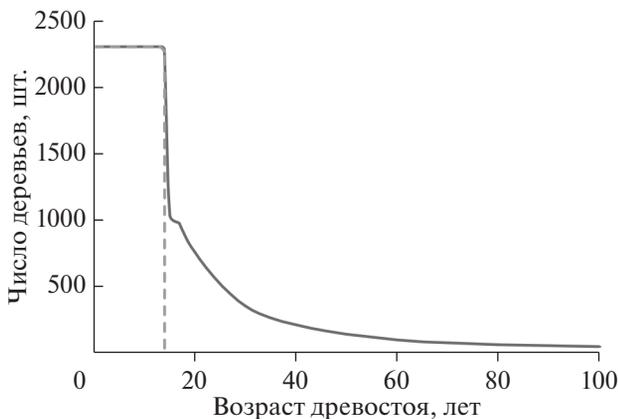
вестной (в частности, Мерзленко, Бабич, 2011) формуле:

$$G_p = 10000/(ve),$$

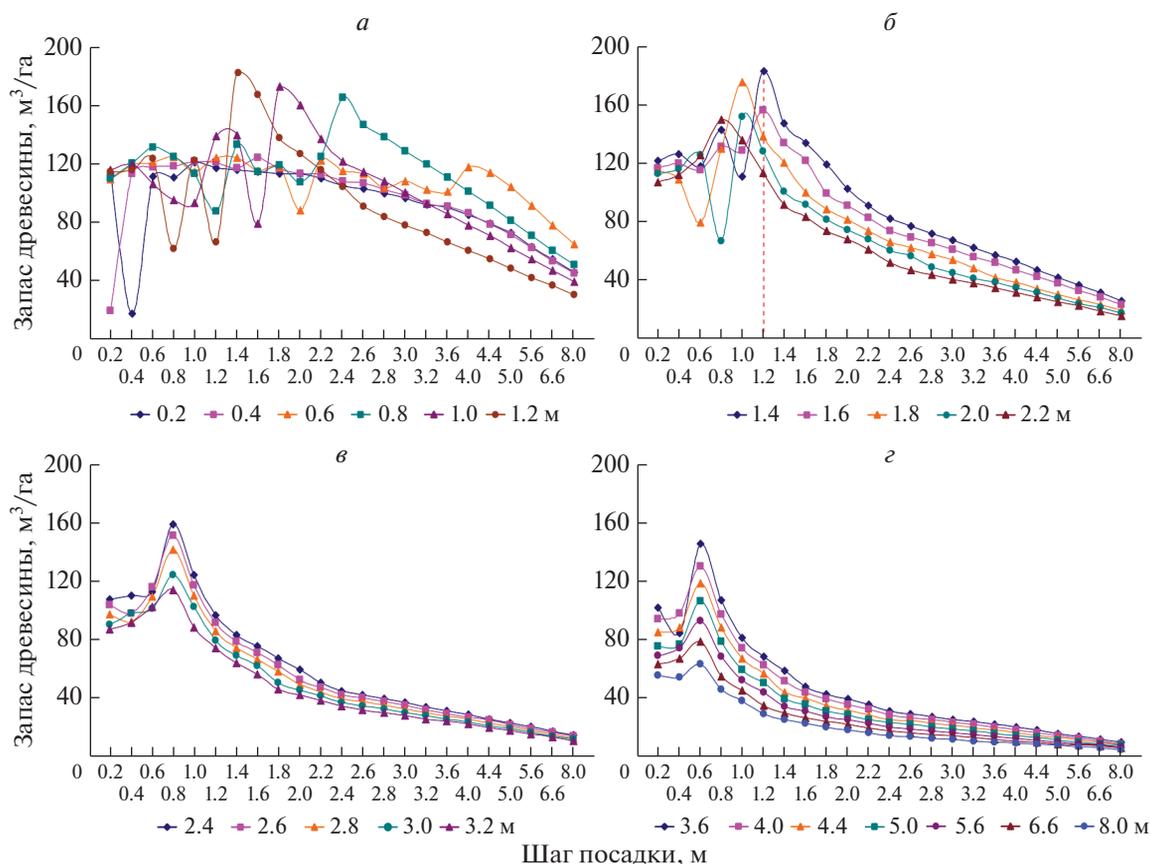
где  $v$  – ширина междурядий,  $e$  – шаг посадки.

Ширину междурядий и шаг посадки изменяли от 0.2 до 8 м с минимальным приращением 0.2 м, что соответствует размеру ячеек, на которые разделена площадь моделируемого участка. Запас древостоя считали в тот момент времени, когда диаметр ствола всех деревьев превышал 6, 14 и 24 см. Это позволяет определить минимальное время, за которое древостой достигает заданных качественных характеристик. При решении задачи максимизации запаса древесины рассматривали случай, когда изреживание древостоя происходит только в результате конкуренции за свет, не учитывая случайную смертность вследствие ветровалов, воздействия фитофагов и других факторов.

На рис. 5–7 показаны графики запаса мелкой, средней, крупной древесины елового насаждения в зависимости от ширины междурядий и шага посадки деревьев. Результаты вычислительных экспериментов показали, что оптимальные значения параметров размещения саженцев для выращивания мелкой, средней и крупной древесины соответственно составляют (ширина междурядий × шаг посадки): 1.4 × 1.2 м, 2 × 2.8 м, 3.6 × 4.4 м (рис. 5–7). При таких вариантах посадки получили следующие значения запаса древесины: мелкая – 186 м<sup>3</sup>/га, средняя – 419 м<sup>3</sup>/га, крупная – 708 м<sup>3</sup>/га. Время, за которое еловый древостой достигает заданных качественных характеристик, составило 37, 69, 160 лет соответственно. Из рис. 5–7 видно, что при увеличении ширины междурядий наибольшие значения запаса древесины (пики) смещаются в сторону уменьшения шага посадки. Например, когда ширина междурядий составляет 0.6 м,



**Рис. 4.** Модельные реализации процесса естественного изреживания одновозрастных еловых насаждений при регулярном начальном расположении саженцев в случае, когда саженцы являются одинаковыми (пунктирная линия) и когда саженцы различаются по степени конкурентоспособности (сплошная линия).



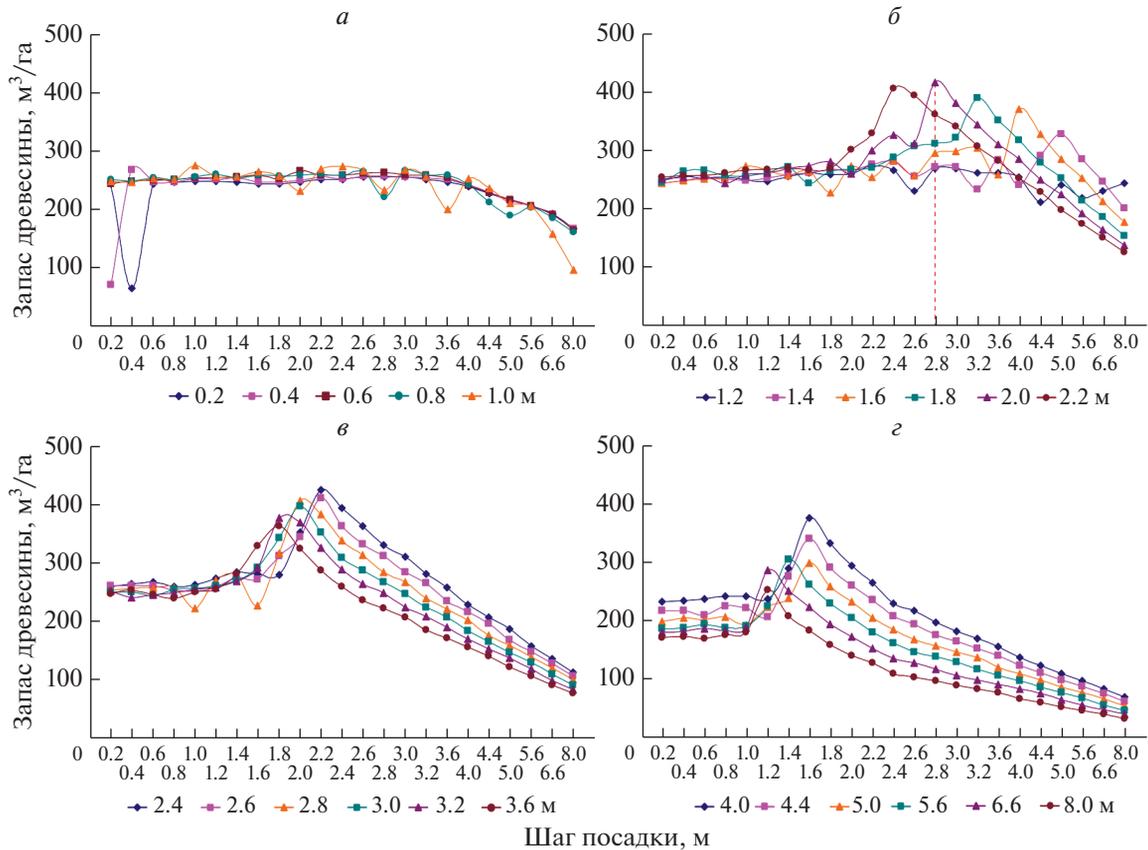
**Рис. 5.** Запас мелкой древесины елового насаждения в зависимости от ширины междурядий и шага посадки саженцев. Ширина междурядий: 0.2–1.2 м (а), 1.4–2.2 м (б), 2.4–3.2 м (в), 3.6–8 м (г).

наибольшее значение запаса мелкой древесины достигается при значении шага посадки, равном 4 м, а когда ширина междурядий составляет 8 м – 0.6 м (рис. 5). Это объясняется тем, что с увеличением густоты посадки древостой (вследствие уменьшения шага посадки) до некоторого оптимального значения запас древесины также увеличивается, но при дальнейшем увеличении густоты посадки процессы естественного изреживания возникают раньше, чем древостой достигает заданных качественных характеристик, что приводит к снижению запаса. Таким образом, для достижения оптимального значения густоты посадки при увеличении ширины междурядий шаг посадки уменьшается. Из графиков также можно увидеть, что чем больше ширина междурядий, тем меньше оптимальная густота посадки (рис. 5). Это связано с тем, что процессы естественного изреживания зависят не только от начальной густоты насаждения, но и от взаимного расположения деревьев.

На рис. 8 показаны графики запаса мелкой, средней и крупной древесины елового насажде-

ния в зависимости от расстояния между деревьями при квадратной схеме посадки. Из графиков видно, что существуют оптимальные значения густоты посадки, при которых наблюдаются наибольшие значения запаса древесины разного класса крупности (рис. 8). Оптимальное расстояние между деревьями для выращивания мелкой, средней и крупной древесины при квадратной схеме посадки соответственно составило: 1.4 × 1.4 м, 2.4 × 2.4 м, 4 × 4 м (рис. 8, 9). Время, за которое еловый древостой достигает заданных качественных характеристик, соответствующих мелкой, средней и крупной древесине, составило 36, 68, 155 лет соответственно. Таким образом, показано, что для максимизации запаса древесины разного класса крупности требуется разная начальная густота насаждения: чем выше класс крупности выращиваемой древесины, тем меньше оптимальная густота посадки.

Рассмотрим более детально, как изменяется запас древесины заданного диаметра в зависимости от начальной густоты насаждения при одинаковой схеме посадки. На рис. 10 приведена динамика за-



**Рис. 6.** Запас средней древесины елового насаждения в зависимости от ширины междурядий и шага посадки саженцев. Ширина междурядий: 0.2–1 м (а), 1.2–2.2 м (б), 2.4–3.6 м (в), 4–8 м (г).

паса древостоя в зависимости от расстояния между саженцами при квадратной схеме посадки:  $1.4 \times 1.4$  м (5102 шт./га),  $1.2 \times 1.2$  м (6944 шт./га),  $1 \times 1$  м (10000 шт./га). Такие варианты посадки выбраны, потому что они демонстрируют нелинейную зависимость между запасом и плотностью древостоя. Отсюда видно, что чем выше начальная плотность насаждения, тем раньше возникает процесс естественного изреживания в силу того, что раньше происходит смыкание крон, усиливая напряженность конкурентных отношений. В данном случае при плотности посадки 5102 шт./га ( $1.4 \times 1.4$  м) достигается максимальный запас мелкой древесины (рис. 8а; рис. 10а, вертикальная линия). Увеличение плотности посадки приводит к резкому снижению запаса в результате процесса изреживания, который начинается раньше, чем древостой достигает заданных качественных характеристик (рис. 8а, 10а). Однако дальнейшее увеличение плотности посадки приводит к повышению запаса в результате того, что количество оставшихся после изреживания деревьев в этом случае оказывается больше, чем в предыдущем (рис. 10б). Таким образом, необходимо достаточно точно подбирать начальную плотность насаждения, изменение

которой может приводить не только к повышению, но и к резкому снижению запаса, в силу возникающих нелинейных эффектов.

В проведенных имитационных экспериментах наблюдается эффект массовой гибели деревьев (рис. 10б). Регулярное расположение деревьев уменьшает неравномерность распределения световых ресурсов между ними, что приводит к одновременной гибели наименее конкурентоспособных деревьев, находящихся в одинаковых условиях затенения. Эффект отмирания значительного числа деревьев в загущенных древостоях естественного и искусственного происхождения в лесоводстве известен уже достаточно давно. Например, одни из первых моделей изреживания можно найти в работах Райнике (Reineke, 1933) и Г.Ф. Хильми (1956). Считается, что основной причиной интенсивного естественного изреживания древостоя является конкуренция за свет, и гибнут наиболее ослабленные деревья.

Далее рассмотрим, как изменяется запас древесины в зависимости от взаимного расположения деревьев при одинаковой плотности посадки. На рис. 11 показана динамика запаса елового древо-

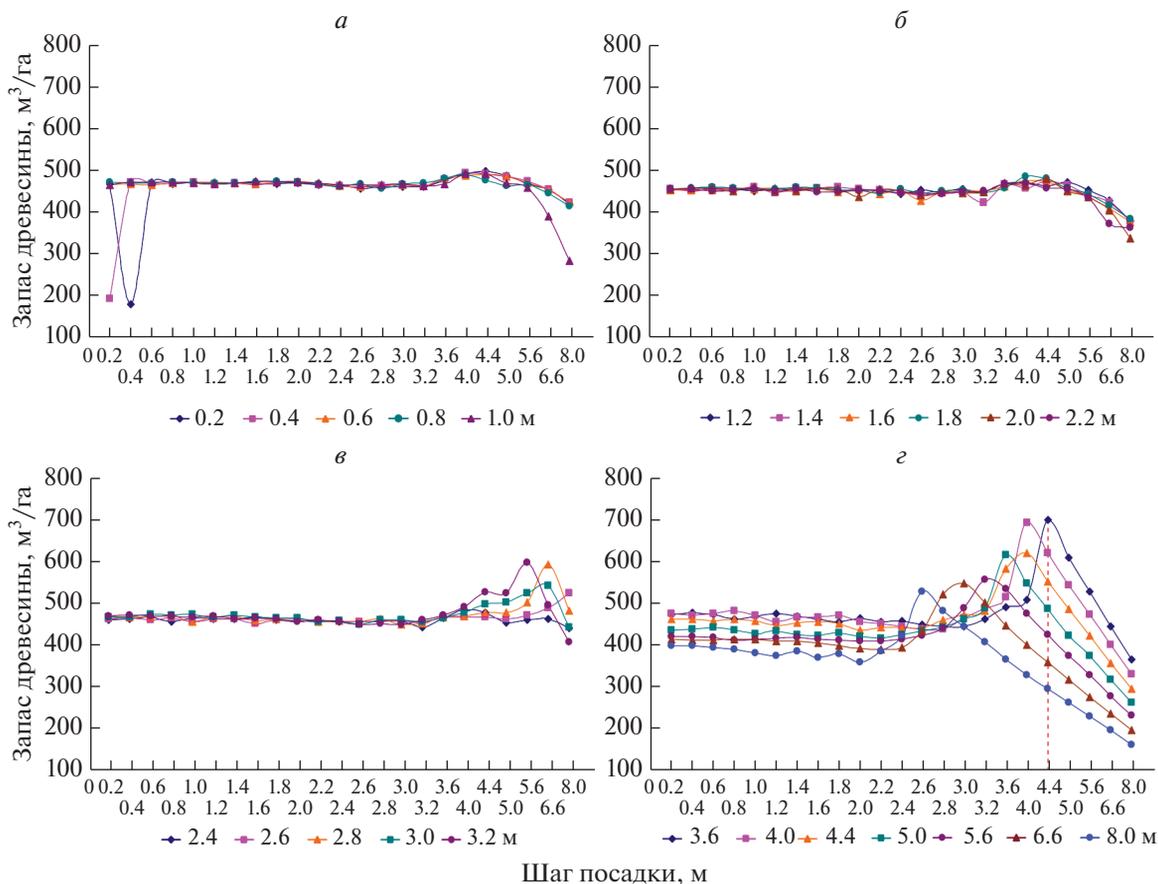


Рис. 7. Запас крупной древесины елового насаждения в зависимости от ширины междурядий и шага посадки саженцев. Ширина междурядий: 0.2–1 м (а), 1.2–2.2 м (б), 2.4–3.2 м (в), 3.6–8 м (г).

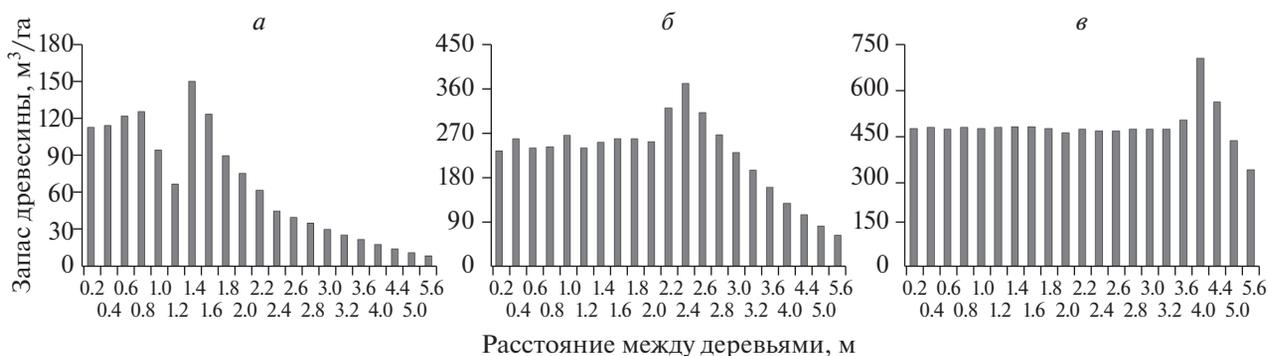
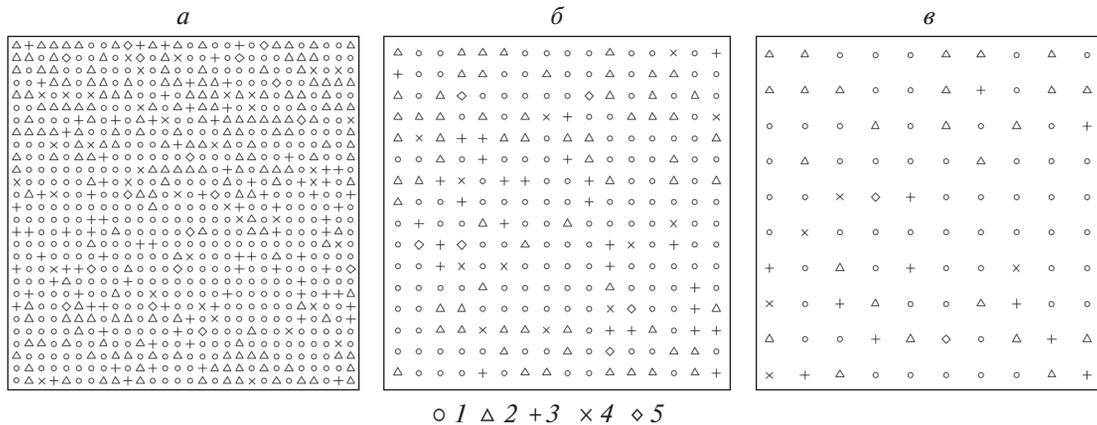


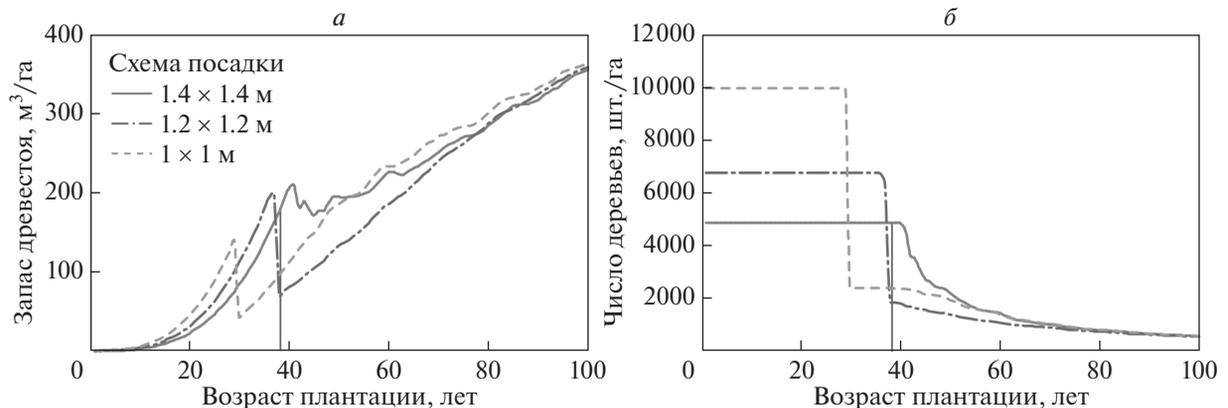
Рис. 8. Запас древесины елового насаждения в зависимости от расстояния между деревьями при квадратной схеме посадки: а – мелкая, б – средняя, в – крупная древесина.

стоя в зависимости от ширины междурядий и шага посадки при одинаковой начальной численности саженцев:  $2 \times 2.8$  м,  $1.4 \times 4$  м,  $1 \times 5.6$  м (1786 шт./га) и  $2 \times 2$  м,  $4 \times 1$  м,  $5 \times 0.8$  м (2500 шт./га). Ширина междурядий 2 м и шаг посадки 2.8 м являются оптимальными, позволяя получить мак-

симальный запас средней древесины (рис. 6; рис. 11а, вертикальная линия). Уменьшение ширины междурядий с одновременным увеличением шага посадки приводит к снижению запаса древесины в результате того, что процесс изреживания начинается раньше (рис. 11а). В этом случае смыкание



**Рис. 9.** Квадратная схема размещения саженцев на участке для выращивания мелкой, средней и крупной древесины. Оптимальные расстояния между саженцами соответственно составляют:  $1.4 \times 1.4$  м (а),  $2.4 \times 2.4$  м (б),  $4 \times 4$  м (в). Значками обозначены деревья, относящиеся к разным группам по степени конкурентоспособности.



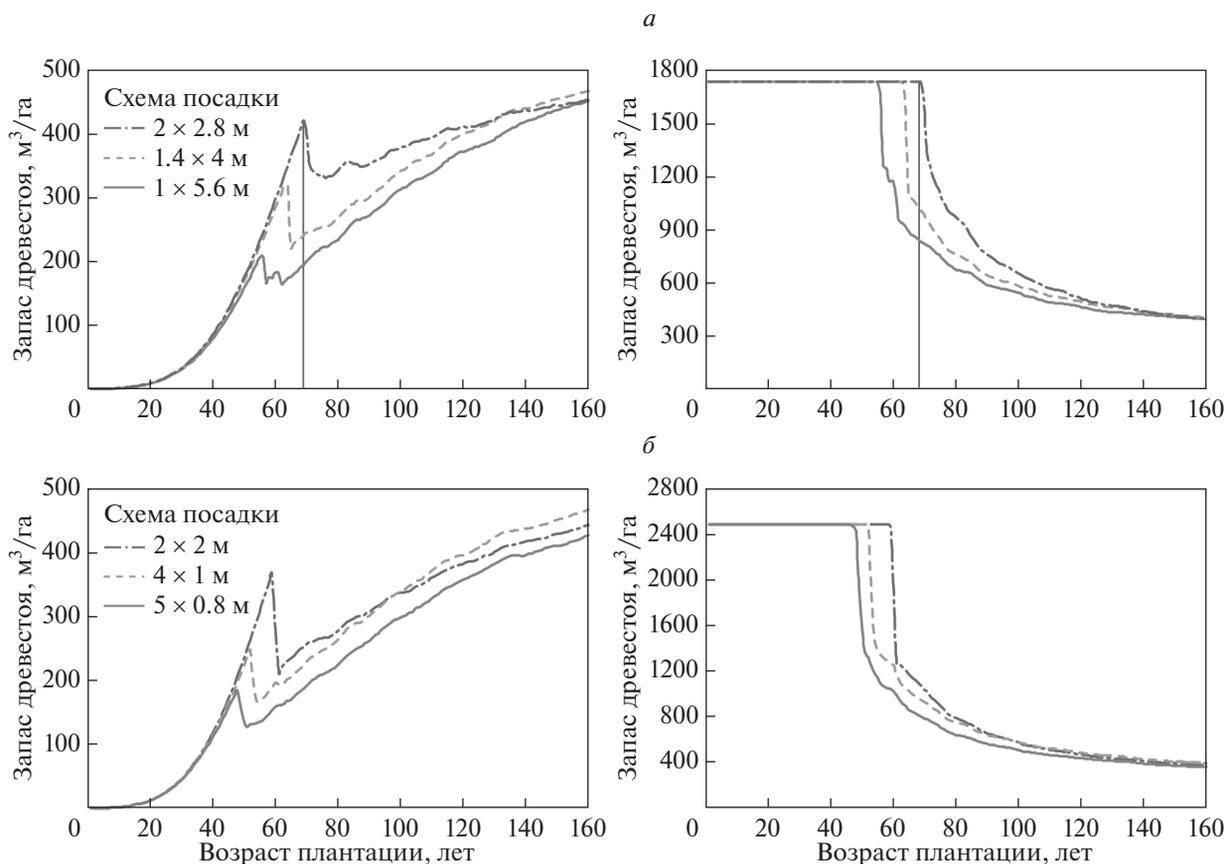
**Рис. 10.** Динамика запаса и численности деревьев елового насаждения в зависимости от расстояния между саженцами при квадратной схеме посадки.

крон деревьев, расположенных в соседних рядах, происходит раньше, усиливая напряженность конкурентных отношений за световые ресурсы. Вместе с тем увеличение шага посадки оказывается недостаточным для существенного улучшения условий освещения, необходимых для дальнейшего роста, что в итоге приводит к отмиранию наименее конкурентоспособных деревьев.

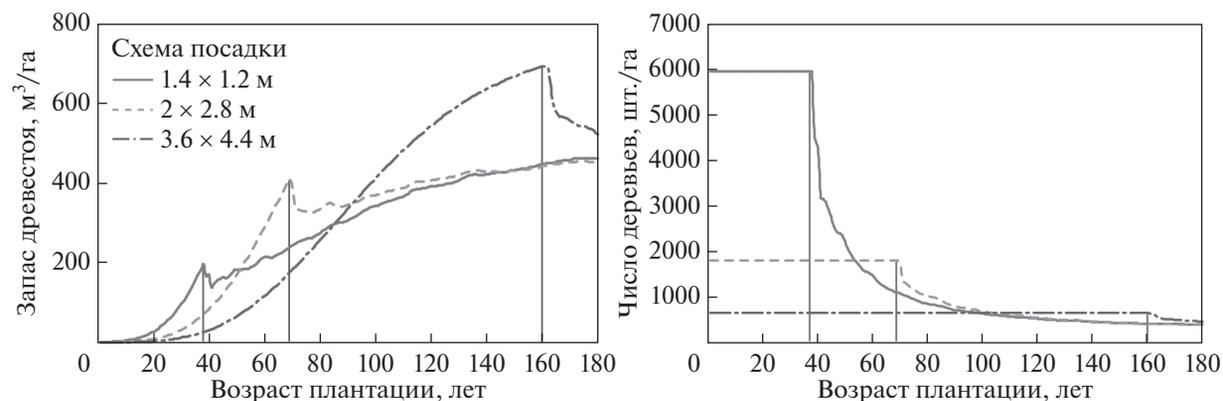
Проведенные вычислительные эксперименты показали, что в случае одинаковой начальной густоты насаждения процесс естественного изреживания древостоя при прямоугольной схеме посадки возникает раньше, чем при квадратной схеме посадки (рис. 11б). Следовательно, для любой прямоугольной схемы посадки существует квадратная схема с более высокой начальной густотой, так что изреживание древостоя в обоих случаях будет происходить одновременно. При этом

с увеличением начальной густоты насаждения запас древесины также увеличивается. Таким образом, квадратная схема посадки является оптимальной для получения максимального запаса древесины заданного диаметра.

В нашем случае полученные оптимальные схемы посадки для выращивания мелкой, средней и крупной древесины не являются квадратными:  $1.4 \times 1.2$  м (5952 шт./га),  $2 \times 2.8$  м (1786 шт./га),  $3.6 \times 4.4$  м (631 шт./га). Это связано с разрешением модели (расстояния между деревьями кратны 0.2 м), которое не позволяет рассмотреть всевозможные значения начальной численности деревьев при квадратной схеме посадки и, соответственно, подобрать оптимальную густоту посадки. Например, в случае прямоугольной схемы посадки  $2 \times 2.8$  м оптимальное число саженцев, расположенных квадратным способом, должно быть больше 1786 шт./га.



**Рис. 11.** Динамика запаса и числа деревьев елового насаждения в зависимости от ширины междурядий и шага посадки при одинаковой начальной численности саженцев.



**Рис. 12.** Динамика запаса и численности деревьев елового насаждения при оптимальных схемах посадки, обеспечивающих максимальный запас мелкой, средней, крупной древесины.

Исходя из разрешения модели, ближайшее значение начальной численности саженцев, которые можно расположить квадратным способом, составляет 2066 шт./га ( $2.2 \times 2.2$  м). В этом случае процесс изреживания древостоя возникает раньше, чем при схеме посадки  $2 \times 2.8$  м, и получаемый запас средней древесины, соответственно,

тоже уменьшается. Следовательно, оптимальное число саженцев при квадратной схеме посадки находится в диапазоне 1786–2066 шт./га.

На рис. 12 показана динамика запаса елового насаждения при оптимальных схемах посадки, обеспечивающих максимальный запас древесины разного класса крупности. Из рисунка видно,

что для оптимальной схемы лесопосадки характерна предельная начальная густота насаждения, при которой естественное изреживание древостоя происходит сразу после того, как все деревья достигли заданного размера диаметра ствола.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанной имитационной модели проведен модельный анализ продуктивности еловых насаждений в зависимости от ширины междурядий и шага посадки деревьев. Показано, что процесс естественного изреживания древостоя зависит как от густоты посадки, так и от взаимного расположения деревьев, что в итоге определяет величину запаса древесины заданного диаметра. Вычислительные эксперименты показали, что при одинаковой начальной численности саженцев квадратная схема посадки является оптимальной для получения максимального запаса древесины заданного диаметра. Установлено, что для получения максимального запаса древесины разного класса крупности требуется разная начальная густота насаждения: чем выше класс крупности выращиваемой древесины, тем меньше оптимальная густота посадки.

При решении задачи максимизации запаса древесины рассматривали случай, когда изреживание древостоя происходит только в результате конкуренции за свет, не учитывая случайную смертность вследствие ветровалов, воздействия фитофагов и других факторов. Таким образом, существуют риски того, что в реальных насаждениях запас древесины, выращиваемой при таких оптимальных схемах посадки, будет существенно ниже по сравнению с полученными расчетными значениями. Поэтому для разработки практических рекомендаций по созданию высокопродуктивных лесных плантаций необходимо провести дополнительные исследования, учитывая гибель деревьев в результате случайных факторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-04-00073 а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Березовская Ф.С., Карев Г.П.*, 2015. Моделирование динамики древостоев // Сиб. лесн. журн. № 3. С. 7–19.

ГОСТ 17462–84, 2000. Продукция лесозаготовительной промышленности. Термины и определения. М.: ИПК издательство стандартов. 11 с.

*Грабарник П.Я.*, 2007. Моделирование пространственной структуры древостоев // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука. С. 132–146.

*Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г.*, 1992. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос. 195 с.

*Карев Г.П., Скоморовский Ю.И.*, 1997. Математические модели изреживания древостоев // Лесоведение. № 4. С. 14–20.

*Колобов А.Н.*, 2014. Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // Лесоведение. № 5. С. 72–82.

*Корякин В.Н.*, 2010. Справочник для учета лесных ресурсов Дальнего Востока. Хабаровск: ДальНИИЛХ. 526 с.

Лесная энциклопедия, 1986 / Под ред. Воробьева Г.И. Т. 2. М.: Советская энциклопедия. 631 с.

*Мерзленко М.Д., Бабич Н.А.*, 2011. Теория и практика искусственного лесовосстановления. Архангельск: САФУ. 239 с.

*Писаренко А.И., Мерзленко М.Д.*, 1990. Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат. 270 с.

*Припутина И.В., Фролова Г.Г., Шанин В.Н.*, 2016а. Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент // Компьютерные исследования и моделирование. Т. 8. № 2. С. 333–343.

*Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А.*, 2016б. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев // Матем. биология и биоинформатика. Т. 11. № 2. С. 245–262.

*Хильми Г.Ф.*, 1957. Теоретическая биогеофизика леса. М.: Изд-во АН СССР. 266 с.

*Шутов И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А.*, 1984. Лесные плантации: ускоренное выращивание ели и сосны. М.: Лесная промышленность. 246 с.

*Fang S., Xu X., Lu S., Tang L.*, 1999. Growth dynamics and biomass production in short-rotation poplar plantations: 6-year results for three clones at four spacings // Biomass Bioenergy. V. 17. № 5. P. 415–425.

*Kolobov A.N., Frisman E.Ya.*, 2016. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands // Ecol. Complex. V. 27. P. 29–39.

*Kolobov A.N., Frisman E.Ya.*, 2018. Evaluate the initial spatial structure and heterogeneity of the composition for spruce and larch stands on real data self-thinning of even-aged stands // Ecol. Complex. V. 34. P. 89–99.

*Larocque G.R.*, 1999. Performance and morphological response of the hybrid poplar DN-74 (*Populus deltoides* × *nigra*) under different spacings on a 4-year rotation // Ann. For. Sci. V. 56. № 4. P. 275–287.

*Reineke L.H.*, 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests // J. Agr. Res. V. 46. № 7. P. 627–638.

## Modeling approach to the analysis of productivity of artificial spruce stands at different planting schemes

A. N. Kolobov<sup>a,\*</sup>, E. Ya. Frisman<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far East Branch of RAS  
Sholom-Aleikhem, 4, Birobidzhan, 679000 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: alex\_0201@mail.ru*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: frisman@mail.ru*

One of the ways to increase the productivity of artificial forestation is to control the density and position of trees relative to each other. In this regard, there are tasks of finding the optimal planting schemes to obtain the maximum stock of wood of a given diameter. On the basis of the simulation model, a comparative analysis of the productivity of spruce stands with different planting schemes was carried out. Rectangular and square planting patterns with different initial forest stand density are considered. The stock of small (trunk diameter 6–13 cm), medium (14–23 cm) and large (over 24 cm) wood was calculated depending on the row spacing and the pitch of trees planted on a site 40 × 40 m in size. At the same time, when choosing the optimal planting scheme, the fact is taken into account that the seedlings are not the same and differ in competitiveness. It is shown that with the same initial number of seedlings, the square planting scheme is optimal. The optimal distance between trees for growing small, medium and large wood with a square planting pattern, respectively, was: 1.4 × 1.4 m, 2.4 × 2.4 m, 4 × 4 m. The time during which the spruce stand reaches the specified qualitative characteristics corresponding to small, medium, and large wood was 36, 68, and 155 years. Thus, it has been shown that in order to obtain the maximum wood stock of a different size class, a different initial density of planting is required: the higher the size class of the grown wood, the lower the optimal planting density.