

А.С. Бондаренко, А.В. Жигунов

**ВЛИЯНИЕ ГУСТОТЫ ПОСАДКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ
СЕМЕЙ ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ
В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУРАХ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ**

Введение. Основой селекционного семеноводства в Российской Федерации является массовый отбор перспективных генотипов в естественных насаждениях с последующей оценкой генетически обусловленных ценных в хозяйственном отношении качеств отобранных по фенотипу плюсовых деревьев в испытательных культурах [Тараканов и др., 2021; Раевский и др., 2022]. При этом в таких испытательных культурах оценивается как семенное потомство самих плюсовых деревьев (что достаточно трудоёмко с точки зрения практической реализации и редко применяется на практике), так и семенное потомство клонов плюсовых деревьев, представленных на лесосеменных и маточных плантациях, а также в архивах клонов плюсовых деревьев [Правила..., 2015; Бондаренко, Жигунов, 2023; Jansson et al., 2017]. Основной целью оценки семей в испытательных культурах является обнаружение среди плюсовых деревьев наиболее ценных генотипов, то есть элитных деревьев, устойчиво передающих семенному потомству наиболее важные хозяйственные признаки. В качестве контроля (стандарта) используют семена каждой популяции, в которых отобраны испытываемые плюсовые деревья. При этом контрольной партией может являться средний образец семян производственного сбора в данной популяции или образец семян, заготовленных с 25–30 случайно отобранных в популяции деревьев. При значительном количестве плюсовых деревьев в популяции (не менее 3–5) контрольный образец семян должен представлять эту популяцию [Основные положения..., 1982]. Подготовка площади и обработка почвы производится по технологии создания лесных культур. Семенное потомство каждого плюсового дерева и контроль высаживаются (высеваются) на делянках квадратной или прямоугольной формы рядами с размещением в соответствии с технологией создания лесных культур [Правила..., 2015; Правила лесовосстановления..., 2021]. Плюсовые деревья, семенные потомства которых по результатам окончательной оценки имеют достоверно лучшие показатели по селективируемым признакам и свойствам

в сравнении с контролем, выделяются в качестве элитных. Элитные деревья используются для создания лесосеменных плантаций второго порядка [Правила..., 2015].

Несмотря на то, что параметрам густоты при создании объектов испытания обычно не придают большого значения, имеются данные, что густота посадок в испытательных культурах существенно влияет на результативность опыта по сравнительному анализу скорости роста семей, в том числе посредством влияния на высоту и диаметр ствола и их корреляции-взаимоотношения [Демиденко, Тараканов, 2008]. Так, например, в испытательных культурах ели сибирской наблюдается выраженное влияние густоты, при которой сформировались материнские деревья, на скорость роста семенных потомств. При этом авторами таких исследований формулируется вывод, что наследуется не столько быстрота роста плюсовых деревьев и популяций, сколько их реакция на условия конкурентной среды, в которой сформировалась популяция, данный конкретный древостой и плюсовые деревья в нем. На основании проведенных исследований авторы рекомендуют изначально отбирать древостой для выделения плюсовых деревьев с минимальной густотой [Рогозин, 2013]. При этом необходимо отметить, что при выявлении воздействия густоты посадки на результаты селекционных испытаний может существенно измениться набор клонов, отбираемый для создания лесосеменных плантаций второго порядка по результатам оценки генотипов в испытательных культурах. В связи с этим с практической точки зрения важно оценить степень влияния густоты посадки деревьев в испытательных культурах на результаты оценки семей, что и является целью нашего исследования.

Материалы и методика исследования. Для достижения поставленной цели изучались следующие участки испытательных культур плюсовых деревьев ели европейской:

- Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, площадь 4,2 га, обследования выполнены в возрасте растений 24, 36 и 46 лет. На участке представлены 90 семей плюсовых деревьев;
- Ленинградская область, Гатчинское лесничество, Таицкое участковое лесничество, кв. 13, поле 38 (территория Гатчинской лесосеменной плантации), площадь 2,5 га, возраст растений 30, 41 год, испытывается 24 семьи плюсовых деревьев;
- Псковская область, Порховское лесничество, Порховское участковое лесничество, кв. 119, площадь 3,7 га, возраст растений 29 лет, испытывается 80 семей плюсовых деревьев.

В рамках полевых работ в посадках испытательных культур выполнена подеревная идентификация семейственной принадлежности растений и проведено измерение диаметра ствола с точностью до 1 мм. На участках в Ломоносовском и Порховском лесничествах при закладке использована наиболее распространенная на Северо-Западе России схема смешения испытательных культур отрезками рядов, при которой каждая семья представлена в нескольких повторностях, представленных на площади участка отрезками рядов различной длины. Количество повторностей в рамках этих участков составляет от 1 до 6 шт. для различных семей плюсовых деревьев. На участке в Гатчинском лесничестве применена редко используемая в России схема смешения семей, в которой каждая семья представлена на площади отрезками по три дерева, равномерно распределенными по площади участка (так называемые малодеревные делянки). При использовании такой схемы опыта увеличивается количество повторностей опыта, приходящихся на одну семью, и повышается точность сравнения значений биометрических показателей испытываемых семей.

Пoderевная оценка скорости роста семей плюсовых деревьев выполнялась по такому признаку, как диаметр ствола дерева, поскольку высотой ствола в качестве основного измеряемого показателя имеет смысл оперировать только в сравнительно молодом возрасте древостоев (до 10–15-летнего возраста культур). При возрасте культур свыше 15 лет по ряду причин, в частности, из-за объективных трудностей для адекватного измерения высот растений, в том числе по причине высокой сомкнутости крон и, как следствие, невозможности подеревного измерения высот растений, роль основного оцениваемого признака при исследованиях переходит к диаметру ствола дерева на высоте груди [Раевский, Щурова, 2016]. Необходимо учитывать, что при использовании для определения высоты растений в насаждениях кривой высот при выполнении статистических анализов сравнения выборок и других целей исследователь, по сути, делает такие сравнения всё по той же выборке диаметров ствола, только по определённой функциональной зависимости (неважно, линейной или в виде другой математической функции), пересчитанной в значения высот. В связи с этим для лесных культур в возрасте старше 10–15 лет при выполнении статистических анализов имеет смысл использовать непосредственно измеряемый биометрический показатель, то есть диаметр ствола дерева.

С целью подбора необходимого статистического инструментария (параметрические либо непараметрические методы сравнения переменных)

для сопоставления различных групп деревьев по средним значениям изучаемых биометрических показателей (например, по среднему диаметру ствола) был выполнен анализ соответствия распределения диаметра ствола критериям нормального распределения признаков. Соответствие фактического распределения признака нормальному распределению выполнено на основе стандартного D-критерия Колмогорова-Смирнова [Боев и др., 2014; ГОСТ Р 50.1.037-2002].

При выполнении анализа по определению соответствия фактического распределения признака теоретическому нормальному распределению использовали данные по всей совокупности деревьев участка испытательных культур за исключением 5 шт. деревьев насаждения в начале и конце ряда и пяти рядов в начале и конце участка культур (с целью устранения так называемого «краевого эффекта»). При выявлении соответствия фактического распределения признака нормальному распределению количественного признака применялись классические параметрические критерии сравнения выборок на основе дисперсионного анализа [Кобзарь, 2006]. Статистические расчёты и построение графиков зависимостей выполнены с использованием программы Statistica 10 [Боровиков, 2003]. Стандартные характеристики эмпирического распределения изучаемых признаков, такие как среднее значение, стандартное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса с соответствующими ошибками этих значений были рассчитаны по общепринятым методикам.

В отношении участка испытательных культур в Ломоносовском лесничестве выполнялось поштучное разделение всех деревьев насаждения по значениям их диаметров на группы густоты. При этом учётной единицей являлись 20-метровые отрезки ряда испытательных культур. Исходная густота посадки растений на данном участке составляла 4,0 тыс.шт./га, поэтому при расстоянии между рядами, равном 2,5 м, в 20-метровом отрезке ряда в среднем содержится 20 шт. растений на момент посадки испытательных культур. Имеющееся в наличии на момент обследования количество растений в отрезке ряда при пересчёте на 1 га даёт возможность вычислить фактическую густоту для каждого учётного 20-метрового отрезка. Необходимо отметить, что в рамках одной повторности может быть представлено несколько 20-метровых отрезков (в зависимости от длины отрезка ряда для одной семьи). В дальнейшем при выполнении статистического анализа всю совокупность 20-метровых отрезков рядов данных испытательных культур группировали по шести группам фактической густоты от 1,0 до 6,0 тыс.шт./га с градацией в

1 тыс.шт./га. Превышение фактической густоты над исходной в некоторых отрезках может объясняться их малым размером (длина всего 20 м) и, как следствие, определённой степенью неравномерности посадки в каждом конкретном отрезке на территории участка (эффект исполнителя при посадке лесных культур).

С целью нивелирования влияния показателя густоты насаждения на зависимость диаметра ствола от семейственной принадлежности растений выполнен расчёт значений диаметра ствола с последующим исключением из этого значения части, которая обусловлена воздействием густоты насаждения (так называемый «анализ остатков» от линии регрессии). В качестве регрессионной функции зависимости диаметра ствола от густоты насаждения для участка испытательных культур в кв. 161 Ломоносовского лесничества используется полином третьей степени вида:

$$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d, \quad (1)$$

где Y – диаметр ствола дерева (см); X – густота насаждения (тыс.шт./га); a , b , c и d – коэффициенты уравнения.

Далее по значениям отклонений фактических значений диаметра ствола от этой линии регрессии рассчитываются так называемые «остатки», которые и являются первичными данными для выполнения статистических тестов. В частности, по таким остаточным отклонениям значений диаметра ствола выполнен дисперсионный анализ влияния семейственной принадлежности дерева на его диаметр [Гржибовский, 2008]. Сопоставление результатов такого анализа, полученного по исходным данным, с соответствующими результатами по анализу «остатков» позволяет оценить влияние густоты на результаты селекционной оценки генотипов в опыте.

Результаты исследования. В рамках исследования производилась оценка влияния густоты закладки лесных культур на значение диаметра ствола. При этом в первую очередь для определения возможности применения параметрических методов сравнения средних значений признака (например, при сравнении значений биометрических показателей, относящихся к различным группам густоты насаждения) выполнен анализ соответствия распределения изучаемого признака классическому нормальному распределению. Такой анализ соответствия фактического распределения теоретическому выполнен на основе применения D-критерия Колмогорова-Смирнова.

При этом для повышения качества выполнения оценки соответствия фактического распределения теоретическому (нормальному) в анализ не включали крайние деревья по периметру насаждения для устранения влияния на распределение так называемого краевого эффекта. По результатам выполненного анализа построена гистограмма распределения деревьев на участке по диаметру ствола (рис. 1).

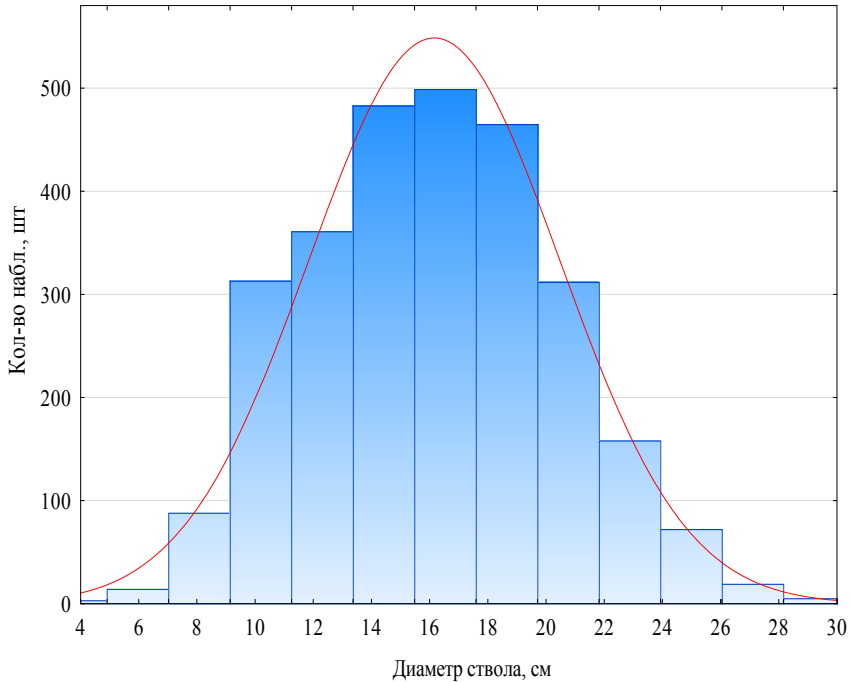


Рис. 1. Гистограмма распределения деревьев по диаметру ствола на участке испытательных культур ели европейской в возрасте 36 лет (Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161)
(—) – нормальное распределение

Fig. 1. Histogram of trunk diameter distribution in European spruce progeny test (Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry, Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)
(—) – normal distribution

Как показали расчёты критерия Колмогорова-Смирнова, данное распределение признака соответствует нормальному распределению на уровне значимости 0,05, что позволяет в дальнейших статистических анализах использовать классические статистические методы сравнения выборок, в частности, дисперсионный анализ.

При оценке роста, развития и сохранности семей плюсовых деревьев в испытательных культурах всю совокупность семей плюсовых деревьев разделили на три практически равные по числу семей группы по значению диаметра ствола и оценили полученные различия приведённых групп по параметрам густоты и сохранности растений. Результаты таких расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные показатели роста и сохранности растений
в группах семей по скорости роста
(Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)**

**Main indicators of growth and preservation of plants in groups of families
by growth rate (Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)**

Группа семей	Диаметр, см	Высота, м	Сохранность, %	Густота, шт./га
Отстающие в росте (28 шт. семей)	$15,3 \pm 0,09$	$18,3 \pm 0,03$	$50,2 \pm 0,29$	$2010 \pm 11,6$
Средние (29 шт. семей)	$16,2 \pm 0,09$	$18,7 \pm 0,03$	$49,1 \pm 0,25$	$1965 \pm 10,1$
Быстрорастущие (28 шт. семей)	$17,3 \pm 0,11$	$19,1 \pm 0,04$	$41,3 \pm 0,28$	$1653 \pm 11,3$
Всего по участку (85 шт. семей)	$16,2 \pm 0,06$	$18,7 \pm 0,02$	$46,9 \pm 0,16$	$1874 \pm 6,4$

В соответствии с полученными данными скорость роста и густота (сохранность) посадок имеют разнонаправленную динамику: при переходе от медленнорастущей группы к быстрорастущей с повышением значений основных биометрических показателей сохранность и густота посадок закономерно снижаются. При этом если рассматривать подобные зависимости по семьям плюсовых деревьев, то такие закономерности не просматриваются: в разных группах по скорости роста наблюдаются совершенно разные по уровню сохранности и густоты семьи плюсовых деревьев (табл. 2; в целях экономии места приведены только пять семей в рамках каждой из групп семей по скорости роста).

Таблица 2

Показатели роста и сохранности растений в рамках отдельных семей плюсовых деревьев (Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Indicators of growth and preservation of plants within individual families of plus trees (Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

Семья плюсового дерева	Диаметр, см	Высота, м	Сохранность, %	Густота, шт./га
Отстающие по скорости роста				
205	$14,3 \pm 0,35$	$18,0 \pm 0,13$	$63,1 \pm 0,58$	2524 ± 23
02 05	$14,9 \pm 0,32$	$18,2 \pm 0,12$	$44,9 \pm 0,55$	1795 ± 22
185	$15,2 \pm 0,44$	$18,3 \pm 0,16$	$65,1 \pm 0,52$	2604 ± 21
02 03	$15,4 \pm 0,37$	$18,4 \pm 0,14$	$54,0 \pm 0,61$	2161 ± 24
121	$15,6 \pm 0,43$	$18,5 \pm 0,16$	$72,0 \pm 0,63$	2878 ± 25
Средние				
06 02	$15,7 \pm 0,35$	$18,5 \pm 0,13$	$59,8 \pm 0,43$	2392 ± 17
274	$15,9 \pm 0,37$	$18,6 \pm 0,14$	$41,5 \pm 0,62$	1661 ± 25
83	$16,2 \pm 0,78$	$18,7 \pm 0,29$	$40,2 \pm 0,56$	1609 ± 22
69	$16,4 \pm 0,43$	$18,8 \pm 0,16$	$40,7 \pm 0,35$	1629 ± 14
51	$16,6 \pm 0,38$	$18,8 \pm 0,14$	$53,5 \pm 0,65$	2141 ± 26
Быстрорастущие				
175	$16,7 \pm 0,8$	$18,9 \pm 0,3$	$18,5 \pm 0,69$	740 ± 28
280	$17 \pm 0,46$	$19,0 \pm 0,17$	$56,0 \pm 1,02$	2238 ± 41
220	$17,1 \pm 1,29$	$19,0 \pm 0,48$	$27,9 \pm 0,74$	1114 ± 29
310	$17,4 \pm 0,55$	$19,1 \pm 0,21$	$49,5 \pm 0,54$	1980 ± 22
299	$18,7 \pm 0,97$	$19,6 \pm 0,36$	$32,5 \pm 1,17$	1300 ± 47
Всего	$16,2 \pm 0,06$	$18,7 \pm 0,02$	$46,9 \pm 0,16$	1874 ± 6

В первую очередь при выполнении исследований оценили, насколько сильно в опыте по испытанию генотипов различаются семьи плюсовых деревьев по скорости роста в общей совокупности (без учёта влияния уровня густоты посадки в рамках насаждения). Для этого был определен уровень различий между семьями по значению среднего диаметра ствола растений на основе дисперсионного анализа. Исследование показало, что в рамках всех совокупностей семей участков испытательных культур наблюдаются

достоверные различия между семьями плюсовых деревьев по значению изучаемого признака (диаметр ствола). Для различных участков испытательных культур значение F-критерия Фишера дисперсионного анализа составляет для диаметра ствола от 2,11 (участок испытательных культур в Таицком участковом лесничестве) до 4,19 (участок испытательных культур в Порховском участковом лесничестве). Все расчётные значения данного критерия достоверны на уровне значимости 5% ($p < 0,05$). Таким образом, на всех участках испытательных культур наблюдаются достоверные различия между семьями по среднему значению диаметра ствола. При этом наблюдается определённая динамика уровня различий между семьями в процессе роста и развития насаждений. Так, например, на участке испытательных культур в Гостилицком участковом лесничестве в возрасте 24 лет достоверность различий между семьями по диаметру ствола высока ($F = 6,73$, $p < 0,001$), к возрасту смыкания и интенсивной конкуренции (36 лет) при общем достоверном различии между семьями уровень значимости различий между семьями несколько снижается, хотя и остаётся в высокой степени достоверным ($F = 2,97$, $p < 0,001$), а при дальнейшем росте и развитии насаждения после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (возраст 46 лет) – снова закономерно увеличивается ($F = 4,90$, $p < 0,001$). Такое наблюдение подтверждает наши предположения о некотором снижении уровня различий между семьями в возрасте высокой интенсивности конкуренции. На другом участке испытательных культур ели европейской (Таицкое участковое лесничество) также наблюдается увеличение значения F-критерия Фишера. При этом следует отметить, что в возрасте 30 лет для результатов дисперсионного анализа значение F-критерия различий между семьями по диаметру ствола на данном участке недостоверно на уровне значимости 5% ($F = 1,50$, $p = 0,06$), в то время как к возрасту 41 год значение F-критерия различий между семьями по диаметру ствола возрастает и становится достоверным ($F = 2,11$, $p = 0,002$). Таким образом, генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской для всех изученных участков испытательных культур по крайней мере с середины второго класса возраста (30 лет для хвойных).

При определении влияния густоты насаждения на проявление признаков продуктивности в первую очередь оценили, насколько сильно фактическая густота в испытательных культурах (в качестве учётной единицы при расчёте текущей густоты испытательных культур использованы 20-метровые отрезки ряда) влияет на значение биометрического показателя (диаметр ствола дерева). Результаты таких расчётов взаимосвязи между густотой посадки испыта-

тельных культур и диаметром ствола деревьев в испытательных культурах ели европейской приведены на рис. 2. В соответствии с результатами непараметрического дисперсионного анализа различия между приведенными на рисунке шестью группами густоты (от 1,0 до 6,0 тыс. шт./га) достоверны (дисперсионный анализ, $F = 17,85$, $p < 0,001$).

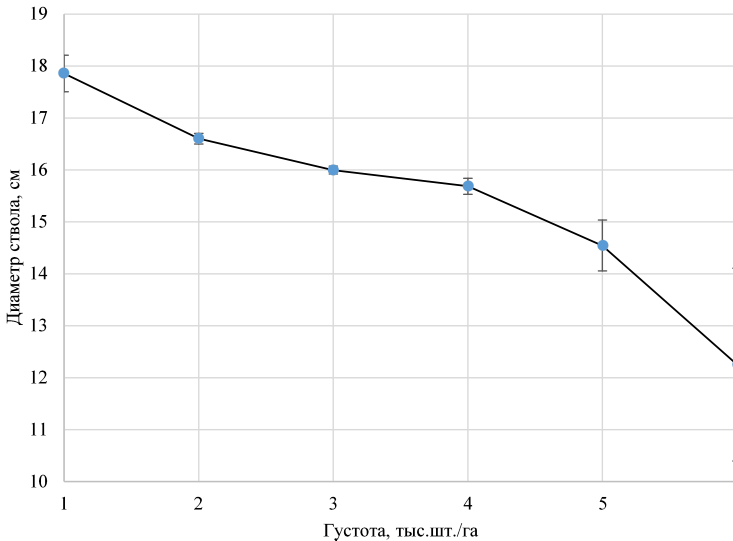


Рис. 2. Зависимость диаметра ствола дерева (среднее значение $\pm$ ошибка среднего значения) от текущей густоты в испытательных культурах ели европейской (Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Fig. 2. Dependence of tree trunk diameter (mean $\pm$ error) on the current density in test cultures of European spruce (Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry, Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

Приведённая на графике обратная зависимость среднего значения диаметра ствола дерева от густоты насаждения в испытательных культурах ели европейской описывается полиномиальной функцией вида

$$y = -0,1147x^3 + 1,0728x^2 - 3,7029x + 20,607. \quad (2)$$

С целью нивелирования влияния показателя густоты насаждения на зависимость диаметра ствола от семейственной принадлежности растений выполнен расчёт значений диаметра ствола с последующим исключением из этого значения части, которая обусловлена воздействием густоты насаждения (так называемый «анализ остатков» от линии регрессии). В качестве регрес-

сионной функции зависимости диаметра ствола от густоты насаждения для участка испытательных культур в кв. 161 Ломоносовского лесничества используется полином третьей степени, приведённый выше. По остаточным значениям диаметра ствола выполнен непараметрический тест Крускала-Уоллеса для оценки уровня влияния семейственной принадлежности дерева на диаметр его ствола. Полученные результаты сходны с результатами анализа, проведенного по значениям диаметра. В частности, F-критерий дисперсионного анализа различий между семьями составил $F = 3,09$ при уровне значимости $p < 0,001$ при анализе «остатков» (то есть при исключении фактора «густота») и 2,97 также при $p < 0,001$ по результатам дисперсионного анализа, выполненного по исходным значениям диаметра ствола по тем же семьям плюсовых деревьев. Таким образом, в соответствии с результатами исследования различия в густоте насаждения не оказывают значимого влияния на уровень зависимости диаметра от семейственной принадлежности дерева и при исследовании влияния генетических факторов на проявление такого признака, как диаметр ствола, различие между насаждениями по уровню густоты в опытах по испытанию семей может не учитываться.

Принимая во внимание выявленные достоверные различия между семьями по скорости роста, оценили, насколько сильно влияют различия по густоте насаждений в выделенных отрезках рядов испытательных культур на показатели достоверности различий между семьями по скорости роста. Для этого разделили всю совокупность деревьев участка на две группы, различающиеся по уровню фактической густоты на момент обследования. Первая группа – отрезки ряда испытательных культур такой же фиксированной длины 20 м с густотой менее 2 тыс. шт./га, во вторую группу вошли отрезки рядов посадок исследуемого участка испытательных культур с фактической густотой свыше 2 тыс. шт./га. Далее определяли уровень различий между семьями по значению диаметра ствола отдельно по каждой из этих групп густоты насаждения. В соответствии с результатами дисперсионного анализа различия между семьями в пределах обеих групп густоты достоверны. В частности, в группе с густотой посадки менее 2 тыс. шт./га значение F-критерия составило $H = 2,22$ при уровне значимости $p < 0,001$, а в группе густоты свыше 2 тыс.шт./га значение данного показателя равно 2,42 ($p < 0,001$). Таким образом, в обеих рассмотренных группах фактической густоты влияние генетического фактора (семейственная принадлежность) на значение диаметра ствола дерева сопоставимо и достоверно на высоком уровне значимости.

Для выявления возможных взаимодействий между генетическими факторами и параметрами густоты насаждения анализировали обратную

вышеописанной картину, а именно уровень различий между семьями по среднему значению густоты насаждения. В соответствии с результатами дисперсионного анализа семьи на изученном участке испытательных культур ели европейской (Гостилицкое участковое лесничество) достоверно различаются по средней густоте насаждения ($F = 2,97$, $p < 0,001$). В качестве иллюстрации приведённого уровня различий между семьями плюсовых деревьев участка испытательных культур (Гостилицкое участковое лесничество) в возрасте 36 лет на рис. 3 приведены средние значения фактической густоты с соответствующими показателями варьирования для отрезков ряда, представляющих отдельные семьи. В качестве учётной единицы использованы те же описанные ранее отрезки ряда длиной 20 м, семьи плюсовых деревьев для графика отобраны произвольно по принципу представленности наиболее широкого спектра средних значений диаметра ствола и упорядочены по возрастанию средней густоты.

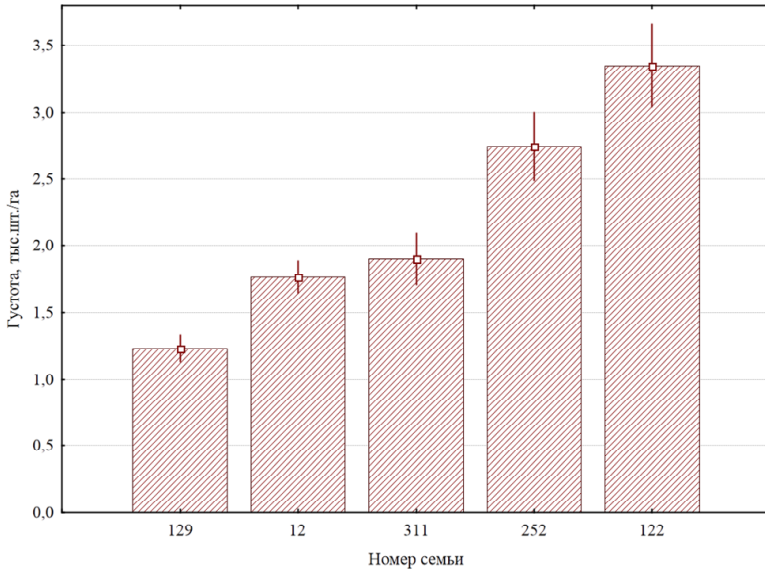


Рис. 3. Различия между отдельными семьями плюсовых деревьев ели европейской по густоте (среднее значение $\pm$ ошибка среднего значения) в пределах одного участка испытательных культур (Ленинградская область, Ломоносовское лесничество, Гостилицкое участковое лесничество, кв. 161, возраст 36 лет)

Fig. 3. Differences between individual families of European spruce plus trees in density (mean value $\pm$ error of the mean value) within one plot of test cultures (Leningrad Region, Lomonosovskoye forestry, Gostilitskoye district forestry, q. 161, age 36 years)

В связи с тем, что наблюдается достоверное влияние как генетических факторов (семейственная принадлежность растений), так и показателей густоты насаждения на скорость роста деревьев ели европейской по диаметру, была выполнена оценка возможного совместного влияния этих факторов на проявление изучаемого признака (взаимодействие по типу «генотип-среда»). С этой целью было отобрано 12 семей плюсовых деревьев, характеризующихся достаточно большим количеством растений в пределах каждой из групп. При этом в рамках каждой группы густоты насчитывалось от 32 до 109 шт. растений для каждой из семей плюсовых деревьев. Повторностей (отрезков рядов испытательных культур) насчитывалось от 1 до 5 шт. в пределах одной группы густоты. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа получено достоверное влияние на значение диаметра ствола как семейственной принадлежности дерева ($F = 4,79$, $p < 0,01$), так и густоты насаждения ($F = 9,55$, $p < 0,01$). Совместное влияние этих факторов также достоверно на уровне значимости 5% ($F = 1,92$, $p = 0,03$), что подтверждает разную реакцию генотипов на изменчивость параметра густоты насаждения. Так, например, семья 08/02 в группе густоты до 2,0 тыс.шт./га имеет средний диаметр $19,2 \pm 1,04$ см, а при густоте свыше 2,0 тыс.шт./га её диаметр достоверно ниже и составляет $15,9 \pm 0,65$ см. Семья 274 демонстрирует несколько иную картину, а именно: в группе густоты до 2,0 тыс.шт./га имеет средний диаметр $15,7 \pm 0,43$ см, а при густоте свыше 2,0 тыс.шт./га диаметр этой семьи плюсового дерева несколько выше – $16,7 \pm 0,69$ см. Тем не менее, следует отметить, что значимость взаимодействия «густота-семейственная принадлежность» зависит от используемого для подобного анализа набора семей плюсовых деревьев. Использование разных наборов семей даёт как достоверные, так и недостоверные результаты оценки взаимодействия «генотип-среда» по результатам дисперсионного анализа. Очевидно, что в исследованиях по оценке результатов испытания семенного потомства плюсовых деревьев необходимо по возможности учитывать фактор совместного влияния генетических факторов и густоты насаждения на проявление признаков продуктивности.

Заключение. Выполненные исследования по оценке влияния густоты посадки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах позволяют сделать следующие выводы:

1. Фактическое распределение диаметра ствола достоверно отличается от классического нормального распределения признаков, в особенности на

крайних (минимум и максимум) ступенях толщины. Отклонение от нормального распределения характеризуется выраженной правосторонней асимметричностью. Расчётное значение коэффициента эксцесса для наблюдаемой совокупности достоверно не отличается от нормального распределения признака;

2. Наблюдаются достоверные различия между семьями плюсовых деревьев по значениям диаметра ствола дерева;

3. Значение показателя достоверности различий между семьями снижается в возрасте смыкания и интенсивной конкуренции насаждений, оставаясь, тем не менее, в границах сохранения достоверных значений. Дальнейший рост и развитие насаждений после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (начало второго класса возраста) приводит к повторному увеличению различий между семьями плюсовых деревьев;

4. Генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской по крайней мере от начала второго класса возраста (20 лет для хвойных) вплоть до возраста окончательной оценки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах (40 лет);

5. Выявлена обратная взаимосвязь скорости роста растений в испытательных культурах с параметрами густоты и сохранности насаждения. При этом имеет место сильная межсемейная изменчивость густоты в рамках групп скорости роста;

6. Влияние текущей густоты насаждения на средний диаметр ствола в испытательных культурах ели европейской имеет вид обратной зависимости (при повышении текущей густоты древостоя средний диаметр ствола закономерно снижается);

7. Получены данные о статистической достоверности совместного влияния густоты насаждения и семейственной принадлежности дерева на диаметр ствола. Уровень такого совместного влияния типа «генотип-среда» на диаметр ствола дерева зависит от используемого для анализа набора семей плюсовых деревьев;

8. Скорость роста и густота (сохранность) посадок имеют разнонаправленную динамику: при переходе от медленнорастущей группы к быстрорастущей с повышением значений основных биометрических показателей сохранность и густота посадок закономерно снижаются.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Сравнительная оценка плюсовых деревьев ели европейской на основе анализа динамики рангового положения их семенного потомства в испытательных культурах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 68–85.

Боев В.М., Борищук Е.Л., Екимов А.К., Безун Д.Н. Руководство по обеспечению решения медико-биологических задач с применением программы Statistica 10.0. Оренбург: ОАО «ИПК «Южный Урал», 2014. 208 с.

Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

Гржибовский А.М. Анализ трех и более независимых групп количественных данных // Экология человека. 2008. № 3. С. 50–58.

ГОСТ Р 50.1.037-2002 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии. М.: Госстандарт России, 2002. 66 с.

Демиденко В.П., Тараканов В.В. Сравнительная оценка интенсивности роста 20-летних потомств плюсовых деревьев сосны в Новосибирской области // Лесное хозяйство. 2008. № 5. С. 36–37.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 468 с.

Основные положения методики закладки испытательных культур плюсовых деревьев основных лесобразующих пород / Государственный комитет СССР по лесному хозяйству, Центральный научно-исследовательский институт лесной генетики и селекции. Воронеж: Изд-во газеты «Коммуна», 1982. 9 с.

Правила лесовосстановления. Утверждены приказом Минприроды России от 29 декабря 2021 г. № 1024.

Правила создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов). Утверждены приказом Минприроды России от 20 октября 2015 г. № 438. М., 2016. 18 с.

Раевский Б.В., Щурова М.Л. Методика селекционно-генетической оценки клонов сосны обыкновенной на лесосеменных плантациях // Сибирский лесной журнал. 2016. № 5. С. 91–98.

Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонок Е.В., Прокопюк В.М., Кукулина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 6. С. 9–37.

Рогозин М.В. Рост потомства ели сибирской в густых и редких испытательных культурах // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. 30, № 1–2. С. 112–115.

Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохозяйственная информация. 2021. № 1. С. 100–143.

Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland // *Scandinavian journal of forest research*. 2017. Vol. 32, no. 4. P. 273–286.

References

Boev V.M., Borshchuk E.L., Ekimov A.K., Begun D.N. *Rukovodstvo po obespecheniyu resheniya mediko-biologicheskikh zadach s primeneniem programmy Statistica 10.0*. [Guidelines for ensuring the solution of biomedical problems using the Statistica 10.0 program]. Orenburg: OAO «IPK «Yuhnyj Ural», 2014. 208 p. (In Russ.)

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Comparative assessment of Norway spruce plus trees based on the analysis of the rank dynamics of their seed progeny in progeny tests. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 243, pp. 68–85. (In Russ.)

Borovikov V.P. *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere: Dlya professionalov*. 2-e izd. [STATISTICA. The art of data analysis on a computer: For professionals. 2nd ed.] St. Petersburg: Piter, 2003. 688 p. (In Russ.)

Demidenko V.P., Tarakanov V.V. Comparative assessment of the growth intensity of 20-year old offspring of pinus plus trees in the Novosibirsk region. *Forestry*, 2008, no. 5, pp. 36–37. (In Russ.)

GOST R 50.1.037-2002. *Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytного raspredeleniya s teoreticheskim*. CHast' II. *Neparametricheskie kriterii* (GOST R 50.1.037-2002 Applied statistics. Rules for verifying the agreement of the experimental distribution with the theoretical one. Part II. Nonparametric criteria.). M.: Gosstandart of Russia, 2002. 66 p. (In Russ.)

Grzhibovskiy A.M. Analiz trekh i bolee nezavisimyykh grupp kolichestvennykh dannykh [Analysis of three or more independent groups of quantitative data]. *Human ecology*, 2008, no. 3, pp. 50–58. (In Russ.)

Jansson G., Hansen J.K., Haapanen M., Kvaalen H., Steffenrem A. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland. *Scandinavian journal of forest research*, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 273–286.

Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 468 p. (In Russ.)

Osnovnye polozheniya metodiki zakladki ispytatel'nykh kul'tur plyusovykh derev'ev osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod [The main provisions of the methodology for foundation of progeny tests for the main forest tree species]. Voronezh: Izd-vo gazety «Kommuna», 1982. 18 p. (In Russ.)

Pravila lesovosstanovleniya (The reforestation rules): utv. prikazom Minprirody Rossii ot 29 dekabrya 2021g. No. 1024. (In Russ.)

Pravila sozdaniya i vydeleniya ob'yektov lesnogo semenovodstva (lesosemennyykh plantatsiy, postoyannykh lesosemennyykh uchastkov i podobnykh ob'yektov) [Rules for

the creation of forest seed production objects (seed orchards, permanent forest seed stands and others)]. Approved by Order of Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 20.10.2015, No. 438, Moscow, 2016. 18 p. (In Russ.)

Raevskiy B.V., Shchurova M.L. Metodika selektsionno-geneticheskoy otsenki klonov sosny obyknovennoy na lesesemennykh plantatsiyakh [The Method For Breeding and genetic assessment of scotch pine clones at forest seed orchards]. *Siberian forest journal*, 2016, no. 5, pp. 91–98. (In Russ.)

Raevskiy B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopiuk V.M., Kuklina K.K. The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production. *Lesnoy Zhurnal* = *Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 9–37. (In Russ.)

Rogozin M.V. Potomstvo eli sibirskoy v ispytatel'nykh kul'turakh raznoy gustomy [The offspring of *Picea sibirica* in progeny test of different densities] *Coniferous boreal zone*, 2013, vol. 30, no. 1–2, pp. 112–115. (In Russ.)

Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tretyakova R.A. Forest Selective Breeding in Russia: Achievements, Challenges, Priorities (Overview). *Forestry information*, 2021, no. 1, pp. 100–143. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.11.2024

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Влияние густоты посадки деревьев на результаты оценки семей в испытательных культурах ели европейской // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 106–124. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.106-124

По результатам исследований в испытательных культурах плюсовых деревьев ели европейской 30–40-летнего возраста получены данные о влиянии густоты насаждения на эффективность сравнительной оценки семей плюсовых деревьев. Отмечена обратная зависимость густоты древостоя от среднего диаметра ствола насаждения. При этом густота насаждения не оказывает достоверного влияния на уровень зависимости диаметра от семейственной принадлежности дерева и значимо не влияет на результаты сравнительной оценки скорости роста семей плюсовых деревьев в испытательных культурах. Совместное влияние густоты насаждения и семейственной принадлежности растений на скорость роста статистически недостоверно, что подтверждает возможность выполнения анализа влияния семейственной принадлежности и густоты насаждения на биометрические показатели отдельно, без учёта их совместного влияния. Вариация густоты в рамках участка испытательных культур не влияет на результаты оценки уровня достоверности различий между семьями. Фактическое распределение диаметра ствола достоверно отличается от классического нормального распределения признака. Значение показателя достоверности различий между семьями снижается в возрасте смыкания и

интенсивной конкуренции насаждений, оставаясь, тем не менее, в границах сохранения достоверных значений. Дальнейший рост и развитие насаждений после окончания интенсивных процессов самоизреживания насаждения (начало второго класса возраста) приводит к повторному увеличению различий между семьями плюсовых деревьев. Генетические факторы (семейственная принадлежность дерева) оказывают статистически достоверное влияние на скорость роста деревьев ели европейской по крайней мере от начала второго класса возраста (20 лет для хвойных) вплоть до возраста окончательной оценки семей плюсовых деревьев в испытательных культурах (40 лет).

Ключевые слова: испытательные культуры, семенное потомство, семья плюсового дерева, густота, скорость роста, оценка.

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Influence of tree density on the results of evaluating families of plus trees in the progeny tests of Norway spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 106–124 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.106-124

Based on the results of studies in test cultures of 30–40-year-old Norway spruce plus trees, data on the influence of plantation density on the efficiency of comparative evaluation of families of plus trees were obtained. The inverse dependence of stand density on the average trunk diameter of the plantation was observed. At the same time, the density of the plantation does not have a significant effect on the level of diameter dependence on the family affiliation of the tree and does not significantly affect the results of comparative assessment of the growth rate of families of plus-trees in the progeny tests. The joint effect of planting density and plant family affiliation on growth rate is statistically insignificant, which confirms the possibility of analyzing the effect of plant family affiliation and planting density on biometric indices separately, without taking into account their joint influence. The actual distribution of trunk diameter is significantly different from the classical normal distribution of the trait. The value of the index of reliability of differences between families decreases at the age of bowing and intensive competition of plantations, remaining, nevertheless, within the limits of preservation of reliable values. Further growth and development of plantations after the end of intensive processes of self-expiration of the plantation (beginning of the second age class) leads to a repeated increase in differences between families of plus-trees. The influence of genetic factors (tree family identity) has a statistically significant effect on the growth rate of Norway spruce trees from at least the beginning of the second age class (20 years for conifers) up to the age of final evaluation of plus-tree families in progeny tests (40 years).

Keywords: progeny test, seed progeny, progeny tests, planting density, comparative assessment, growth rate.

БОНДАРЕНКО Александр Сергеевич – ведущий научный сотрудник лаборатории научно-исследовательского отдела селекции, воспроизводства и химического ухода за лесом Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3074-7219. ORCID: 0000-0002-2773-8254.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: asbond@mail.ru

BONDARENKO Aleksandr S. – PhD (Agriculture), Leading Researcher at the Laboratory of the Scientific Research Department of breeding, reproduction and chemical care of the forest, Saint Petersburg State Forestry Research Institute. SPIN-code: 3074-7219. ORCID: 0000-0002-2773-8254.

194021. Institutsky av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: asbond@mail.ru

ЖИГУНОВ Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

ZHIGUNOV Anatoliy V. – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Forest Crops, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6704-5792. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru