

УДК 630*232.1:582.475 (470.22)

СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПЛЮСОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУРАХ

Б. В. Раевский

*Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

В испытательных культурах 12-летнего возраста исследованы показатели сохранности, роста и развития 72 семенных потомств от свободного опыления клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на лесосеменной плантации I порядка. Показано, что изученный период роста характеризовался незначительным снижением показателя сохранности – на 5,6 %. После 12 вегетационных сезонов испытательные культуры в целом имели высокий уровень сохранности (84,5 %), что свидетельствует об их успешном росте. Вся совокупность вариантов полусибсов имела равную сохранность с контролем. Проведенные исследования показали, что в первое десятилетие роста испытательных культур наблюдается не только некоторое снижение их сохранности, но и сокращение числа потомств, статистически достоверно превосходящих контроль. Уменьшается относительная разница по высоте этих вариантов с контролем. На фоне указанных трендов отмечена статистически значимая корреляция между высотами материнских клонов и их семенного потомства от свободного опыления, а также положительная динамика данного параметра за весь период исследований (от $r = 0,28$ в 2014 г. до $r = 0,34$ в 2024 г.). В период с 2018 по 2024 г. в культурах произошла существенная переранжировка вариантов по успешности роста. К настоящему моменту только пять (6,9 %) полусибсовых потомств сохранили статистическое преимущество перед контролем по диаметру ствола на высоте груди (13,3 %) и по высоте ствола (7,0 %). Сделано заключение, что неразвитость сети испытательных культур в системе единого генетико-селекционного комплекса РФ в ближайшей перспективе будет выступать серьезным ограничителем дальнейшего развития системы плюсовой селекции. В частности, это касается перспектив создания лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; испытательные культуры; клоны; плюсовые деревья; селекционно-генетическая оценка; полусибсовые потомства

Для цитирования: Раевский Б. В. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной в испытательных культурах // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 86–98. doi: 10.17076/eco2075

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН, рег. № 1210615000820-2).

B. V. Raevsky. GENETIC-SELECTION ASSESSMENT OF SCOTS PINE PLUS TREES IN A PROGENY TRIAL

Forest Research Institute, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

The growth and survival of 72 half-sib families of Scots pine plus trees (*Pinus sylvestris* L.) were studied in a progeny trial at the Man'ga site. It was found that within the first decade after planting, the survival rate of the progeny declined slightly, totally by 5.6 %. After 12 growing seasons, the total survival rate of all trial variants was equal to 84.5 %, indicating good wellbeing of the progeny. The overall survival rate of the half-sib variants was equal to the survival rate of the control. It was revealed that in the course of the past 12-year period not only the survival rate but also the share of progenies which were statistically superior to the control decreased gradually, along with their height difference from the control. At the same time, there was statistically valid moderate correlation between the heights of parental clones and their half-sib progenies, which showed a positive trend (from $r = 0.28$ in 2014 to $r = 0.34$ in 2024) during the study period. In the period from 2018 to 2024, the variants underwent a substantial rearrangement in terms of growth success. To date, only 5 half-sib families (6.9 %) are still superior to the control in diameter at breast height (by 13.3 %) and in stem height (by 7.0 %). It is stated that the lack of progeny test sites in the Russian forest tree breeding system will seriously hinder plus tree breeding in the country in the near future. This is especially true for the prospects of seed orchards of supreme breeding value.

Keywords: Scots pine; progeny trial; clones; plus trees; genetic-selection assessment; half-sib families

For citation: Raevsky B. V. Genetic-selection assessment of Scots pine plus trees in a progeny trial. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 8. P. 86–98. doi: 10.17076/eco2075

Funding. The study was funded from the federal budget under state assignment to KarRC RAS (Forest Research Institute KarRC RAS, ID 1210615000820-2).

Введение

Важнейшим этапом I (базового) селекционного цикла в системе рекуррентной плюсовой селекции является комплексная селекционно-генетическая оценка отобранных (*in situ*) по фенотипу плюсовых деревьев (ПД) путем испытания их вегетативного (клонового) и семенного потомства в специальных тестовых посадках (*ex situ*). Роль таких посадок для вегетативных потомств обычно выполняют лесосеменные плантации (ЛСП) I порядка и архивы клонов, а семенные потомства испытываются в испытательных культурах (ИК). Селекционно-генетическая оценка (СГО) семенных потомств (семей) ПД сосны в испытательных культурах требует времени. В первую очередь это связано с тем, что согласно существующим на сегодняшний день нормативным требованиям [Указания..., 2000] для создания ЛСП повышенной генетической ценности (I.5 порядка) необходимы результаты предварительной генетической оценки, полученные в испытательных культурах по достижении потомствами II класса возраста. Таким образом, для хвойных пород требуемый период не может быть короче 21 года. Однако в настоящее время накопилось уже немало эксперимен-

тальных данных, указывающих на то, что надежные предварительные оценки успешности роста и развития семей сосны обыкновенной могут быть даны гораздо раньше, примерно в возрасте 7–10 лет [Squillace, Gansel, 1974; Lindgren, 1984; Маслаков, 1984; Рогозин, 1990; Danell, 1993; Нааранен, 2002; Федорков, Туркин, 2005].

Испытательные культуры представляют собой самый неразвитый компонент единого селекционно-генетического комплекса (ЕГСК) РФ. Данные, полученные при их изучении, носят достаточно противоречивый характер [Ефимов, 1981, 2010; Багаев, 1983; Федорков, 1999; Туркин, 2007; Демиденко, Тараканов, 2008; Царев, Лаур, 2009]. В большинстве публикаций речь идет о сравнительной оценке роста семенных потомств от свободного опыления клонов ПД, представленных на ЛСП I порядка. Обобщая их выводы, можно заключить, что доля потомств, достоверно превышающих контроль, в возрастном промежутке от 6 до 30 лет может составить по высоте 20–22 %, а по диаметру – до 10 %. При этом необходимо учитывать, что в первые 10–15 лет роста культур основным непосредственно измеряемым и оцениваемым показателем является высота растений. В дальнейшем эта роль переходит

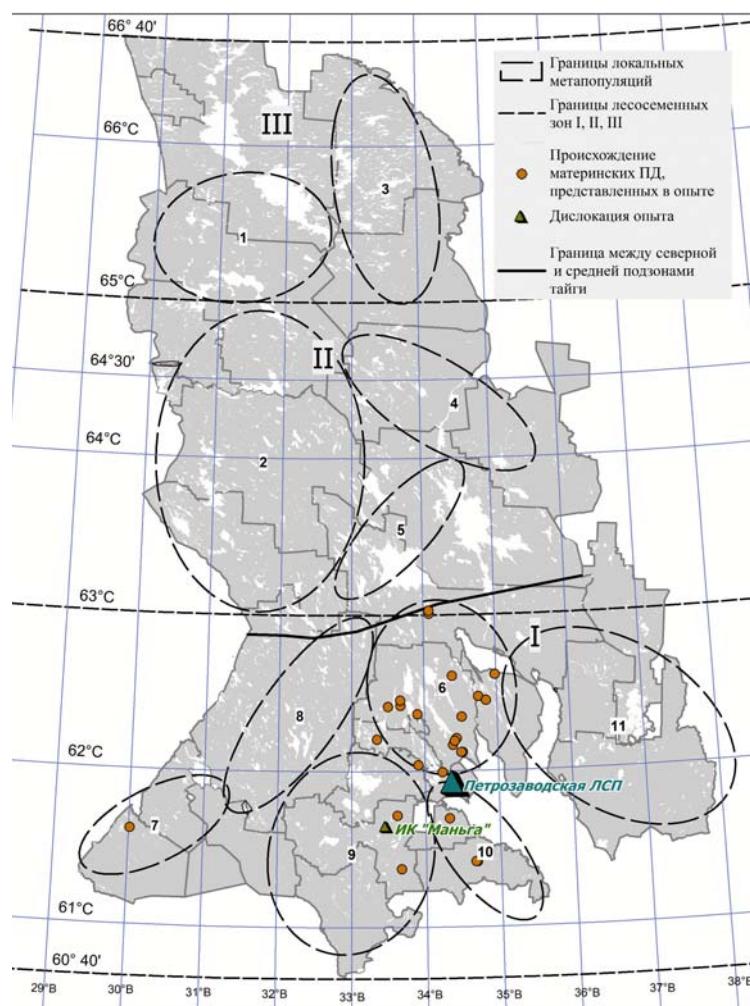
к диаметру на высоте груди. Для такого рода объектов показатель общей комбинационной способности (ОКС) лучших вариантов обычно оценивается на уровне 5–15 %, максимально до 19–22 %. Как правило, определяются невысокие (0,1...0,3) величины коэффициента наследуемости в узком смысле (η^2), отражающего долю аддитивных эффектов [Молотков, Паттай, 1990]. Имеющаяся информация дает повод некоторым исследователям делать выводы о нулевом и даже отрицательном эффекте плюсовой селекции [Авров, 2001; Рогозин, 2015].

В Карелии на сегодняшний день создано всего 16,1 га испытательных культур сосны обыкновенной, где представлено 228 семей от свободного опыления [Лесной..., 2018]. В настоящей статье рассматриваются результаты многолетних исследований сохранности хода роста семей от свободного опыления на участке

испытательных культур сосны обыкновенной, созданном весной 2012 г. в окрестностях деревни Маньга, расположенной в Пряжинском районе Республики Карелия.

Методика и объекты исследования

В 2007–2011 гг. на Петрозаводской ЛСП была проведена комплексная селекционно-генетическая оценка 72 клоновых потомств сосны обыкновенной. Отобранные для наблюдений клоны сосны обыкновенной (по пять нормально развитых рамет на каждый клон) произрастили в пределах одного поля плантации, заложенного в 1982–1984 гг. Их материнские деревья (*in situ*) дислоцированы в подзоне средней тайги, Южнокарельская лесосеменная зона I, локальные метапопуляции №№ 6, 7, 9, 10 [Раевский, 2015], где расположена и сама плантация (рис.).



Дислокация материнских плюсовых деревьев, семенные потомства которых представлены в ИК «Маньга»

Location of parental plus trees which half-sib progenies are tested in the Manga progeny trial

Весной 2011 г. образцы семян с исследуемыми клонами были высажены в теплице питомника «Вилга». Тепличные сеянцы с закрытой корневой системой (ЗКС) выращивались по стандартной технологии в течение одного вегетационного сезона в 5-кратной повторности. Во второй половине мая 2012 г. потомства всех клонов высажены на лесокультурную площадь (4 га). Испытательные культуры были созданы на территории бывшего лесопитомника в окрестности д. Маньга Пряжинского района Республики Карелия. Далее по тексту объект именуется как испытательные культуры (ИК) «Маньга». Обработка почвы осуществлялась способом сплошной вспашки с оборотом пласта. Посадка однолетних тепличных сеянцев с ЗКС производилась вручную, с использованием финской посадочной трубы «Pottiputki». Варианты были размещены на трех полях целыми рядами и как фрагменты рядов, с соблюдением принципа полной рандомизации. В одной повторности высаживалось не менее 25 растений. В 9-кратной повторности был представлен контроль – сеянцы, выращенные из общего образца семян Петрозаводской ЛСП.

В 2013, 2014, 2016, 2018 гг. в культурах проводились сплошные учеты, с тем чтобы оценить следующие параметры:

- приживаемость и сохранность, как долю (%) живых растений по отношению к общему числу высаженных;
- повреждаемость, как долю (%) поврежденных тем или иным фактором растений по отношению к общему числу живых особей;
- общую высоту растений и прирост в высоту (см) за последний вегетационный сезон.

Результаты исследований обобщены в публикации [Раевский и др., 2020]. Осенью 2024 г. выполнено очередное сплошное обследование ИК. Сохранность и повреждаемость культур определялись так же, как и в предшествующих исследованиях. В отличие от предыдущих учетов в 2024 г. в качестве основного измеряемого параметра выступал диаметр ствола на высоте груди (ДВГ), измерявшийся мерной вилкой «Haglof» с точностью до 1 мм. Высота ствола определялась расчетным путем на основании регрессионного уравнения, интерполирующего данные общего графика высот, построенного на основании замеров высоты у 100 деревьев с известным диаметром ствола. Измерение высоты модельных деревьев осуществлялось с использованием мерного шеста «Nestle» с точностью до 1 см. Результаты замеров обрабатывались с использованием общепринятых статистических методик [Ивантер, Коросов, 2003].

Результаты и обсуждение

По результатам комплексной СГО 72 плюсовых деревьев на Петрозаводской ЛСП (2007–2011 гг.) и в ИК «Маньга» (2014–2018 гг.) было отобрано 10 лучших генотипов по совокупности показателей роста в высоту, обилию семеношения и скорости роста семенного потомства от свободного опыления [Раевский и др., 2020]. Таким образом, доля ПД (клонов) сосны – кандидатов в элиту составила 13,9 % от числа всех исследованных ПД.

Расчет и сравнение показателей сохранности, как, впрочем, и показателей роста, осуществлялись в целом по всему объекту, далее – по совокупности всех семей от свободного опыления (полусибсовых потомств) в сравнении с контролем, а затем – на индивидуальном уровне, то есть в разрезе сравнения отдельных семей (вариантов) с контролем. Контролем являлся вариант, сеянцы которого выращены из общего образца семян, собранного в тот же год на Петрозаводской ЛСП. Таким образом, при анализе данных следует учитывать, что и контроль, и все остальные варианты (полусибсовые семьи) выращены из семян с ЛСП I порядка, поэтому относятся к селекционной категории «улучшенные». По результатам учета 2024 г. средняя сохранность по всему объекту составила 84,3 %, в т. ч. полусибы – 84,2 %, контроль – 85,2 %. Следует заключить, что в целом ИК «Маньга» характеризуются высоким уровнем сохранности, что, безусловно, свидетельствует об успешности их роста и развития за весь период жизни с момента посадки культур.

В таблице 1 дано распределение испытываемых семей и их численности (доли) по уровням сохранности. Сохранность отдельного варианта считалась средней, если она была близка к средней сохранности культур, определенной на год учета. Как следует из данных табл. 1, за весь период исследований в культурах наблюдался умеренный отпад, выраженный в общем снижении показателя сохранности, сопровождавшийся соответствующим уменьшением доли вариантов с его высоким значением. За весь 10-летний период учетов (2014–2024 гг.) общая средняя сохранность культур снизилась всего на 5,6 %. На момент последнего обследования 80 % семей клонов – кандидатов в элиту характеризовались средней величиной сохранности.

Как отмечено выше, с 2024 г. главным непосредственно измеряемым показателем в испытательных культурах стал диаметр на высоте

Таблица 1. Показатели сохранности вариантов в испытательных культурах сосны

Table 1. Survival rate of half-sib progenies in the Manga progeny trial

Год Year	Сохранность, % Survival rate, %		
	пониженная lowered (60,1–75,0)	средняя middle (75,1–90,0)	высокая high (90,1–100)
2014 г. Средняя общая сохранность / Average survival – 89,8 %	577	Контроль, 6, 32, 62, 109, 156, 361, 396, 448, 459, 504, 508, 512, 515, 516 , 573, 651, 688, 809, 835 , 841, 849, 850, 856 , 861, 864 , 871, 900, 1026	12, 36, 37, 40, 50, 59, 60 , 63, 104, 107 , 110, 114 , 157, 158, 432, 437, 451, 505, 510, 513, 522, 528, 578, 644, 645, 654, 656, 657, 687, 752, 780, 795, 804, 815, 829 , 853, 855, 865, 875, 876 , 956, 962 , 1038
Среднее Average, %	73,3	85,8	94,0
Доля вариантов Proportion, %	1,4	39,7	58,9
2016 г. Средняя общая сохранность / Average survival – 88,0 %	448, 577, 850	Контроль, 6, 32, 59, 62, 109, 156, 157, 158, 361, 396, 432, 437, 459, 504, 508, 512, 515, 516 , 528, 573, 644, 645, 651, 688, 780, 809, 841, 849, 853, 856 , 835 , 861, 864 , 871, 875, 900, 962 , 1026	12, 36, 37, 40, 50, 60 , 63, 104, 107 , 110, 114 , 451, 505, 510, 513, 522, 578, 654, 656, 657, 687, 752, 795, 804, 815, 829 , 855, 865, 876 , 956, 1038
Среднее Average, %	72,7	84,7	93,5
Доля вариантов Proportion, %	4,1	53,4	42,5
2018 г. Средняя общая сохранность / Average survival – 85,8 %	32, 448, 577, 850	Контроль, 6, 50, 59, 62, 109, 114 , 156, 157, 158, 361, 396, 432, 437, 459, 504, 508, 510, 512, 513, 515, 516 , 528, 573, 644, 645, 651, 654, 657, 687, 688, 780, 809, 815, 835 , 841, 849, 853, 856 , 861, 864 , 871, 875, 900, 962 , 1026, 1038	12, 36, 37, 40, 60 , 63, 104, 107 , 110, 451, 505, 522, 578, 656, 752, 795, 804, 829 , 855, 865, 876 , 956
Среднее Average, %	72,5	84,6	92,8
Доля вариантов Proportion, %	5,5	64,4	30,1
2024 г. Средняя общая сохранность / Average survival – 84,2 %	32, 62, 361, 448, 515, 577, 850, 864	Контроль, 6, 12, 36, 50, 59, 60 , 104, 107 , 109, 110, 114 , 156, 157, 158, 396, 432, 437, 459, 504, 508, 510, 512, 513, 516 , 528, 573, 644, 645, 651, 654, 657, 687, 688, 752, 780, 804, 809, 815, 829 , 835 , 841, 849, 853, 856 , 861, 871, 900, 962 , 1026, 1038	37, 40, 63, 451, 505, 522, 578, 656, 795, 855, 865, 875, 876 , 956
Среднее Average, %	72,5	84,5	92,5
Доля вариантов Proportion, %	10,8	68,9	20,3

Примечание. Здесь и в табл. 6 полужирным выделены номера семей клонов – кандидатов в элиту.

Note. Here and in Table 6 ID numbers of clones that are candidates to elite are given in bold.

груди (ДВГ). В таблицах 2 и 3 представлены результаты статистической обработки замеров ДВГ растений и их рассчитанных высот, как в целом по культурам, так и отдельно по категориям – полусибы и контроль. Рассчитывался весь комплекс показателей описательной статистики, в т. ч. оценки асимметрии и эксцесса. Соответствие эмпирического распределения нормальному закону оценивалось по критериям χ^2 и λ . С целью сократить вариабельность

диаметра и высоты из расчета были исключены ослабленные и поврежденные экземпляры и вообще все деревья с ДВГ менее 3,1 см. Таким образом, в состав выборок попали только деревья, отнесенные к категории «здоровые» и начиная со ступени толщины 4 (3,1–4,0 см). Следует подчеркнуть, что в данном случае при вычислениях первичные даты объединялись в единую совокупность и в целом по объекту, и в разрезе таких категорий, как полусибы и контроль.

Анализ данных табл. 2 показывает, что средние диаметры в целом по культурам, а также в разрезе категорий «полусибы» и «контроль» оказались практически равными. У последних распределение дат по ступеням толщины (градация 1 см) существенно отклонялось от теоретических частот нормального распределения. Для них также был характерен положительный эксцесс. Как известно, статистически достоверными асимметрия и эксцесс принимаются при условии, если величина их оценок превышает пороговое значение равное 3 [Ивантер, Коросов, 2003]. Распределение дат категории «контроль» по исследуемому параметру полностью соответствовало закономерностям нормального распределения.

Как следует из данных табл. 3, аналогично параметру ДВГ средние высоты в целом по культурам, а также в разрезе категорий «полусибы» и «контроль» оказались практически равными. Так же, как и в случае с ДВГ, у последних распределение дат по ступеням высоты (градация 0,4 м) существенно отклонялось от теоретических частот нормального распределения. Однако в отличие от диаметра для них были характерны отрицательная правосторонняя асимметрия и отрицательный эксцесс. Распределение дат категории «контроль» по параметру «высота ствола» полностью соответствовало закономерностям нормального распределения.

В терминах биометрии все деревья на исследуемом участке испытательных культур

Таблица 2. Показатели описательной статистики параметра «диаметр на высоте груди» (см) в ИК «Маньга»
Table 2. Descriptive statistics of the diameter at breast height parameter (cm) in the Manga progeny trial

Показатели Parameters	Все варианты All variants	Полусибы Half-sib families	Контроль Control
Число наблюдений (N) Data number	7506	7142	364
Минимальное значение (Min) Minimal data	3,1	3,1	3,1
Максимальное значение (Max) Maximal data	13,3	13,1	13,3
Среднее (\bar{X}) Mean value	7,1	7,1	7,0
Ошибка среднего (m_x) Mean error	0,02	0,02	0,09
Стандартное отклонение (σ) Standard deviation	1,85	1,857	1,656
Коэффициент вариации (CV, %) Variation	25,9	26,0	23,5
Асимметрия (A) Skewness	0,0528	0,049	0,117
Ошибка асимметрии (m_A) Skewness error	0,028	0,029	0,128
Оценка асимметрии ($T_A = A/m_A$) Skewness estimation	1,9	1,7	0,9
Эксцесс (E) Kurtosis	0,436	0,463	0,279
Ошибка эксцесса (m_E) Kurtosis error	0,057	0,058	0,255
Оценка эксцесса ($t_E = E/m_E$) Kurtosis estimation	7,6	8,0	1,1
Критерий χ^2 Chi-square criteria	28,3	28,6	3,2
Число степеней свободы Degrees of freedom	3	3	3
Стандартные значения χ^2 Standard Chi-square values	7,8–11,3–16,3	7,8–11,3–16,3	7,8–11,3–16,3
Критерий λ (Колмогорова – Смирнова) Kolmogorov – Smirnov criteria	1,88	1,86	0,33
Стандартные значения λ Standard λ values		1,36–1,63–1,95	
Точность опыта (P, %) Accuracy assessment	0,28	0,28	1,29

Таблица 3. Показатели описательной статистики параметра «высота ствола» (м) в ИК «Маньга»

Table 3. Descriptive statistics of the stem height parameter (m) in the Manga progeny trial

Показатели Parameters	Все варианты All variants	Полусибы Half-sib families	Контроль Control
Число наблюдений (N) Data number	7506	7142	364
Минимальное значение (Min) Minimal data	2,82	2,82	2,82
Максимальное значение (Max) Maximal data	6,06	6,02	6,06
Среднее (X) Mean value	4,37	4,37	4,34
Ошибка среднего (m_x) Mean error	0,007	0,007	0,03
Стандартное отклонение (σ) Standard deviation	0,63	0,64	0,57
Коэффициент вариации (CV, %) Variation	14,5	14,6	13,2
Асимметрия (A) Skewness	-0,25	-0,252	-0,264
Ошибка асимметрии (m_A) Skewness error	0,028	0,029	0,128
Оценка асимметрии ($T_A = A/m_A$) Skewness estimation	-8,9	-8,7	-2,1
Эксцесс (E) Kurtosis	-0,506	-0,526	-0,038
Ошибка эксцесса (m_E) Kurtosis error	0,057	0,058	0,255
Оценка эксцесса ($t_E = E/m_E$) Kurtosis estimation	-8,9	-9,1	-0,1
Критерий χ^2 Chi-square criteria	191,5	188,6	8,4
Число степеней свободы Degrees of freedom	5	5	5
Стандартные значения χ^2 Standard Chi-square values	11,1–15,1–20,5	11,1–15,1–20,5	11,1–15,1–20,5
Критерий λ (Колмогорова – Смирнова) Kolmogorov – Smirnov criteria	4,2	4,1	0,8
Стандартные значения λ Standard λ values	1,36–1,63–1,95		
Точность опыта (P, %) Accuracy assessment	0,16	0,16	0,69

рассматриваются в качестве генеральной совокупности конечного размера. В процессе исследования все варианты замерялись полностью, то есть культуры обследовались всплошную. Однако в нашем опыте представлена лишь небольшая часть ПД сосны, отобранных в лесосеменной зоне I, и только некоторая часть семенного потомства их клонов. Поэтому теория биометрии позволяет оценивать исследуемую совокупность в качестве выборки большого объема из некоей гипотетической генеральной совокупности и рассчитывать для ее выборочных средних весь набор оценочных статистических показателей. Анализируя данные табл. 2 и 3, следует отметить ряд важных закономерностей. Во-первых, эмпирические

распределения первичных дат общей выборки и полусибсов показали существенное отклонение от нормального закона. Это может свидетельствовать о биологической разнородности материала. При этом выборка «контроль» практически идеально соответствовала теоретическим частотам нормального распределения. Как уже упоминалось, растения для контроля выращивались из смеси семян испытываемых клонов. То есть их происхождение и селекционная категория такие же, как и в случае с полусибсовыми семьями. Поэтому причины наблюдавшихся аномалий в распределении дат категорий «все варианты» и «полусибы» пока обосновать затруднительно. Во-вторых, категории «полусибы» и «контроль»

по ДВГ и высоте ствола статистически существенных различий не имели. Данный факт, исходя из всего вышеизложенного, выглядит вполне объяснимым.

Средние диаметры и высоты, рассчитанные для каждого из испытываемых вариантов, представляют собой ряд частных средних, характеризующих набор выборок меньшего объема, извлеченных из исследуемой нами большой совокупности. В их распределении выявлены следующие особенности. Общий средний диаметр, вычисленный через ряд частных средних, оказался на 0,1 см (1,4 %) больше, чем вычисленный путем прямого деления суммы всех

значений на число наблюдений. В отношении общей средней высоты это превышение составило 2,0 см (0,5 %). Коэффициент варьирования частных средних был в 3,8 раза меньше, чем аналогичный показатель для дат большой выборки. Распределение частных средних соответствовало нормальному закону, хотя для исходной общей совокупности первичных дат это условие не выполнялось (табл. 4 и 5).

С целью оценки статистической достоверности различий испытываемых семей сосны обыкновенной по отношению к контролю (табл. 6) был использован простой критерий достоверности разности выборочных средних Стьюдента (T_{st}).

Таблица 4. Показатели описательной статистики параметра «диаметр на высоте груди» (см) по совокупности частных средних (вариантов) в ИК «Маньга»

Table 4. Descriptive statistics of the diameter at breast height parameter (cm) in the Manga progeny trial calculated for the set of partial means (variants)

Показатели Parameters	Все варианты All variants	Полусибы Half-sib families
Число наблюдений (N) Data number	73	72
Минимальное значение (Min) Minimal data	6,4	6,4
Максимальное значение (Max) Maximal data	8,6	8,6
Среднее (X) Mean value	7,2	7,2
Ошибка среднего (m_x) Mean error	0,06	0,06
Стандартное отклонение (σ) Standard deviation	0,5	0,5
Коэффициент вариации (CV, %) Variation	6,9	6,9
Асимметрия (A) Skewness	0,752	0,735
Ошибка асимметрии (m_A) Skewness error	0,283	0,285
Оценка асимметрии ($T_A = A/m_A$) Skewness estimation	2,7	2,6
Эксцесс (E) Kurtosis	0,17	0,121
Ошибка эксцесса (m_E) Kurtosis error	0,559	0,563
Оценка эксцесса ($t_E = E/m_E$) Kurtosis estimation	0,3	0,2
Критерий χ^2 Chi-square criteria	8,9	9,2
Число степеней свободы Degrees of freedom	3	3
Стандартные значения χ^2 Standard Chi-square values	7,8–11,3–16,3	7,8–11,3–16,3
Критерий λ (Колмогорова – Смирнова) Kolmogorov – Smirnov criteria	0,50	0,55
Стандартные значения λ Standard λ values		1,36–1,63–1,95
Точность опыта (P, %) Accuracy assessment	0,83	0,83

Таблица 5. Показатели описательной статистики параметра «высота ствола» (м) по совокупности частных средних (вариантов) в ИК «Маньга»

Table 5. Descriptive statistics of the stem height parameter (m) in the Manga progeny trial calculated for the set of partial means (variants)

Показатели Parameters	Все варианты All variants	Полусибы Half-sib families
Число наблюдений (N) Data number	73	72
Минимальное значение (Min) Minimal data	4,12	4,11
Максимальное значение (Max) Maximal data	4,85	4,85
Среднее (X) Mean value	4,39	4,39
Ошибка среднего (m_x) Mean error	0,02	0,02
Стандартное отклонение (σ) Standard deviation	0,168	0,169
Коэффициент вариации (CV, %) Variation	3,8	3,8
Асимметрия (A) Skewness	0,669	0,654
Ошибка асимметрии (m_A) Skewness error	0,283	0,285
Оценка асимметрии ($T_A = A/m_A$) Skewness estimation	2,4	2,3
Эксцесс (E) Kurtosis	0,026	-0,021
Ошибка эксцесса (m_E) Kurtosis error	0,559	0,563
Оценка эксцесса ($t_E = E/m_E$) Kurtosis estimation	0,047	-0,037
Критерий χ^2 Chi-square criteria	3,8	3,4
Число степеней свободы Degrees of freedom	2	2
Стандартные значения χ^2 Standard Chi-square values	6,0–9,2–13,7	6,0–9,2–13,8
Критерий λ (Колмогорова – Смирнова) Kolmogorov – Smirnov criteria	0,44	0,4
Стандартные значения λ Standard λ values	1,36–1,63–1,95	
Точность опыта (P, %) Accuracy assessment	0,46	0,46

Для полусибсовых потомств ПД вычислялась общая комбинационная способность как относительное (%) превышение показателя исследуемого признака (диаметра) того или иного потомства над его величиной у контроля. Как следует из данных табл. 6, величина ОКС постепенно уменьшалась в течение всего периода учетов. На текущий момент, несмотря на то что не все полусибы – кандидаты в элиту имеют достоверное преимущество перед контролем, средние ДВГ и высота по всей данной группе статистически достоверно превышают ($T_{st} = 2,7$) соответствующие показатели контроля на 7,7 и 4,1 %. Для пяти семей, сохранивших на момент

последнего исследования статистически достоверное преимущество перед контролем, величины ОКС составили 13,3 и 7,0 % соответственно.

Однофакторный дисперсионный анализ выявил статистически достоверное влияние генетических особенностей материнских ПД (клонов) на различия в росте полусибсовых потомств. Показатель силы влияния исследуемого фактора составил $h^2 = 0,05$ или 5,0 % (критерий Фишера $F_{\text{факт}} = 6,9$ при табличном $F_{st} = 1,3–1,4–1,6$). По результатам последнего предыдущего учета 2018 г. (измеряемый признак – высота ствола) величина данного показателя составила $h^2 = 0,12$ ($F_{\text{факт}} = 13,8$).

Таблица 6. Распределение семей сосны обыкновенной по уровню достоверности различия с контролем в испытательных культурах

Table 6. Distribution of Scots pine families by the levels of statistical confidence in the Manga progeny trial

Год Измеряемый признак Year Measured feature	Достоверность различия (Tst)* Statistical confidence			
	< 2,0	2,0–4,0	4,1–6,0	6,1 и более / 6.1 and more
2014 г. Высота ствола, см Stem height, cm	6, 12, 109, 157, 158, 361, 396, 448, 515, 573, 577, 654, 688, 780, 850, 853, 855, 861, 871, 1026, 1038.	459, 504, 516 , 528, 578, 62, 63, 644, 651, 687, 795, 835 , 841, 849, 875	104, 32, 432, 513, 522, 645, 657, 809, 864	107 , 110, 114 , 156, 36, 37, 40, 437, 451, 50, 505, 508, 510, 512, 59, 60 , 656, 752, 804, 815, 829 , 856 , 865, 876 , 900, 956, 962
Среднее Tst Average	0,5	3,3	5,3	9,0
Доля Proportion, %	29,2	20,8	12,5	37,5
Среднее значение ОКС Average GCA, %	1,7	14,3	23,2	34,4
2016 г. Высота ствола, см Stem height, cm	6, 12, 36, 37, 104, 109, 157, 158, 361, 396, 432, 448, 515, 522, 528, 573, 577, 644, 654, 687, 688, 780, 795, 809, 850, 853, 855, 861, 871, 1026, 1038.	110, 40, 459, 504, 835 , 508, 510, 516 , 578, 62, 63, 651, 657, 841, 849, 856 , 875, 156	32, 512, 513, 59, 645, 864	107 , 114 , 437, 451, 50, 505, 60 , 656, 752, 804, 815, 829 , 865, 876 , 900, 956, 962
Среднее Tst Average	-0,1	3,1	4,7	8,1
Доля Proportion, %	43,1	25,0	8,3	23,6
Среднее значение ОКС Average GCA, %	-0,5	13,5	21,3	32,4
2018 г. Высота ствола, см Stem height, cm	6, 12, 36, 37, 40, 104, 109, 157, 158, 361, 396, 432, 448, 510, 515, 522, 528, 573, 577, 644, 651, 654, 657, 687, 688, 780, 795, 809, 841, 850, 853, 855, 861, 871, 1026, 1038	110, 156, 459, 504, 508, 513, 516 , 578, 59, 62, 63, 645, 849, 835 , 856 , 875	32, 437, 451, 512, 60 , 829 , 864	107 , 114 , 50, 505, 656, 752, 804, 815, 865, 876 , 900, 956, 962
Среднее Average	-0,4	2,7	4,6	7,6
Доля Proportion, %	50	22,2	9,7	18,1
Среднее значение ОКС Average GCA, %	-0,8	9,1	17,6	24,5
2024 г. Диаметр ствола на высоте груди, см Diameter at breast height, cm	6, 12, 36, 37, 40, 59, 60 , 62, 63, 104, 107 , 109, 110, 157, 158, 361, 396, 432, 448, 451, 459, 30 5043 508, 510, 513, 515 , 516 , 522, 528, 573, 577, 578, 644, 651, 654, 657, 687, 688, 752, 780, 795, 809, 841, 850, 853, 856, 861, 864, 871, 875, 1026, 1038	50, 156, 437, 512, 645, 804, 815, 829 , 835 , 849, 900, 962	32, 114 , 505, 656, 865, 876 , 956	
Среднее Tst Average	-0,4	3,1	4,9	
Доля Proportion, %	73,6	16,7	9,7	
Среднее значение ОКС Average GCA, %	-0,9	9,8	15,8	

Примечание. *Стандартные значения критерия Стьюдента $Tst = \{2,0–2,6–3,3\}$. ОКС – общая комбинационная способность.

Note. *Standard values of Student's criteria $Tst = \{2.0–2.6–3.3\}$. GCA – general combining ability.

В предыдущих исследованиях выявлена статистически значимая умеренная корреляция между высотой материнских клонов и их семенного потомства. Так, в 2014 г. коэффициент корреляции r составил 0,28, в 2016 г. – 0,31, а в 2018 г. – 0,33. Результаты расчета коэффициента корреляции по данным 2024 г. представлены в табл. 7.

Таблица 7. Коэффициент корреляции параметров материнских клонов и их полусибсовых потомств в 2024 г.

Table 7. Correlation between parent clones and their half-sib families' parameters in 2024

Материнские клоны Parent clones	Полусибсовые потомства Half-sib families	
	ДВГ, см DBH, см	Высота ствола, м Stem height, m
Высота ствола, м Stem Height, m	0,34**	0,34**
ДВГ, см DBH, см	0,30**	0,29*

Примечание. Пороговые достоверные значения коэффициента корреляции при уровнях значимости * $p = 0,05$; ** $p = 0,01$; *** $p = 0,001$ и $n = 72$: $r = \{0,23\text{--}0,30\text{--}0,38\}$.

Note. Threshold limit values of correlation coefficient at confidence levels * $p = 0.05$; ** $p = 0.01$; *** $p = 0.001$ when $n = 72$: $r = \{0.23\text{--}0.30\text{--}0.38\}$.

Таким образом, на основании 10-летних наблюдений можно заключить, что в первые 12 лет роста культур теснота корреляционной связи между высотой материнского клона и его потомства от свободного опыления была статистически значимой и проявила слабую тенденцию к увеличению. Имеющийся материал позволяет подойти к вопросу оценки наследуемости такого важнейшего показателя, как быстрота роста у сосны обыкновенной. Известно, что коэффициент наследуемости в узком смысле представляет собой отношение аддитивной компоненты генотипической вариансы к общей фенотипической ($\eta^2 = \sigma_A^2 / \sigma_{ph}^2$). Данный показатель может быть рассчитан несколькими способами, в т. ч. как равный удвоенному коэффициенту корреляции по выбранному признаку в системе «родители – потомки» [Котов, Лебедева, 1977]. В соответствии с данным методическим подходом исходная величина (η^2) составила: в 2014 г. – 0,56; 2016 г. – 0,62; 2018 г. – 0,66, а в 2024 г. – 0,68. Небольшой по величине, но устойчивый положительный тренд по данному показателю вполне очевиден.

Заключение

Неразвитость сети испытательных культур в системе единого генетико-селекционного комплекса РФ в ближайшей перспективе будет выступать серьезным ограничителем его дальнейшего развития, в частности, в аспекте создания ЛСП повышенной генетической ценности. Поэтому многолетние наблюдения на каждом из существующих участков ИК имеют исключительную ценность. Особенно важно, когда данные по успешности роста полусибсовых потомств анализируются в комплексе с информацией в отношении клонов, полученной на ЛСП. Обобщая полученную в период с 2014 по 2024 г. информацию по участку ИК «Маньга», следует отметить следующее.

Испытательные культуры в целом характеризуются высоким уровнем сохранности (84,5 %), и это свидетельствует, что они благополучно пережили первое, самое трудное для молодых растений, десятилетие роста. Доля вариантов с минимальной сохранностью 60,1–75,0 % составила всего 10,8 % от общего числа испытываемых. Вся совокупность вариантов полусибсов имела равную сохранность с контролем.

Проведенные исследования показали, что в первое десятилетие роста испытательных культур наблюдается некоторое снижение их сохранности при сокращении числа потомств, статистически достоверно превосходящих контроль. Уменьшается относительная разница по высоте этих вариантов с контролем. На фоне указанных трендов отмечены увеличение с возрастом тесноты статистически значимой корреляции между высотами материнских клонов и их семенного потомства от свободного опыления и, соответственно, рост величины коэффициента наследуемости в узком смысле. Указанные тенденции свидетельствуют, что для реализации генетических особенностей вариантов требуется время.

В период с 2018 по 2024 г. в культурах произошла существенная переранжировка вариантов по успешности роста. К лесокультурному возрасту, равному 12 годам, только пять (6,9 %) полусибсовых потомств имели статистическое преимущество перед контролем по диаметру ствола на высоте груди – 13,3 % и по высоте ствола – 7,0 %. Можно прогнозировать, что, имея диаметр ствола на высоте груди в качестве главного измеряемого признака, данные, которые будут получены при замерах в 16-летнем возрасте (2028 г.), можно будет считать окончательными для этого этапа селекционно-генетической оценки.

Литература

- Авров Ф. Д. Генетическая устойчивость лесов // Лесное хозяйство. 2001. № 3. С. 46–47.
- Багаев С. Н. Способ предварительной оценки плюсовых деревьев по потомству // Лесное хозяйство. 1983. № 2. С. 34–35.
- 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.
- Ефимов Ю. П. Рост полусибового потомства сосны обыкновенной из семян разных репродукций // Разработка основ систем селекции древесных пород. Ч. I. Рига, 1981. С. 73–77.
- Ефимов Ю. П. Семенные плантации в селекции и семеноводстве сосны обыкновенной. Воронеж: Истоки, 2010. 252 с.
- Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Учебное пособие. Петрозаводск, 2003. 304 с.
- Котов М. М., Лебедева Э. П. Применение биометрических методов в лесной селекции. Горький: ГГУ, 1977. 120 с.
- Лесной план по Республике Карелия / Утв. распоряжением Главы Республики Карелия от 24 декабря 2018 года № 731-р. М., 2018. 161 с.
- Маслаков Е. Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.
- Молотков П. И., Паттай И. Н. Стратегия селекции и семеноводства сосны обыкновенной // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений: Мат-лы междунар. симпоз. (25–30 сент. 1989 г.) / Ред. С. А. Петров и др. М., 1990. С. 9–16.
- Раевский Б. В. Селекция и семеноводство сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm) на северо-западе таежной зоны России: Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. Петрозаводск, 2015. 43 с.
- Раевский Б. В., Кулинина К. К., Щурова М. Л. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 3. С. 45–49. doi: 10.17076/eb1163
- Рогозин М. В. Ступенчатое испытание потомства и модель ускоренного сортовыведения у лесных пород. Пермь: Университет, 1990. 11 с.
- Рогозин М. В. Программа селекции хвойных пород в лесосеменном районе // Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири: Матер. 4-го междунар. совещ. Барнаул, 2015. С. 150–151.
- Туркин А. А. Испытание потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной на примере Республики Коми: Автореф. дис. ... канд. с.-х. н. Сыктывкар, 2007. 20 с.
- Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации / Утв. 11 января 2000 г. Федеральной службой лесного хозяйства России. М., 2000. 197 с.
- Федорков А. Л. Результаты испытания плюсовых деревьев по потомству // Лесное хозяйство. 1999. № 6. С. 28–29.
- Федорков А. Л., Туркин А. А. Возраст оценки потомства в испытательных культурах плюсовых деревьев сосны // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2005. № 4. С. 19–20.
- Царев А. П., Лаур Н. В. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Лесной вестник. 2009. № 1(64). С. 103–107.
- Danell O. Tree breeding strategy: are we too concerned conservationists but inefficient breeders? // Progeny Testing and Breeding Strategies. Proceeding of the Nordic Group of Tree Breeding / S. J. Lee (ed.). October 1993, Edinburgh, Forestry Commision. P. 80–94.
- Haapanen M. Evaluation of options for use in efficient genetic field testing of *Pinus sylvestris* (L.) // Finnish Forest Research Institute, Research Papers 826. 2002. 144 p.
- Lindgren D. Prediction and optimization of genetic gain with regard to genotype x environment interactions // Studia Forestalia Suecica. 1984. Vol. 166. P. 15–24.
- Squillace A. E., Gansel Ch. R. Juvenile: Mature correlations in Slash pine // Forest Sci. 1974. Vol. 20, no. 3. P. 225–229.

References

- Avrov F. D. Genetic stability of forests. *Lesnoe khozyaistvo = Forestry Journal*. 2001;3:46–47. (In Russ.)
- Bagaev S. N. A method for preliminary assessment of plus trees by offspring. *Lesnoe khozyaistvo = Forestry Journal*. 1983;2:34–35. (In Russ.)
- Danell O. Tree breeding strategy: are we too concerned conservationists but inefficient breeders? *Progeny Testing and Breeding Strategies. Proceeding of the Nordic Group of Tree Breeding*. October 1993. Edinburgh, Forestry Commision. P. 80–94.
- Demidenko V. P., Tarakanov V. V. Comparative assessment of the growth rate of 20-year-old offspring of plus pine trees in the Novosibirsk Region. *Lesnoe khozyaistvo = Forestry Journal*. 2008;5:36–37. (In Russ.)
- Efimov Yu. P. The growth of half-sibs of Scots pine from seeds of different reproductions. *Razrabotka osnov sistem selektsii drevesnykh porod = Development of the foundations of tree breeding systems*. Part I. Riga; 1981. P. 73–77. (In Russ.)
- Efimov Yu. P. Seed orchards in Scots pine breeding and seed production. Voronezh: Istoki; 2010. 252 p. (In Russ.)
- Fedorkov A. L. Results of plus trees progeny testing. *Lesnoe khozyaistvo = Forestry Journal*. 1999;6:28–29. (In Russ.)
- Fedorkov A. L., Turkin A. A. Time of assessment of Scots pine plus trees progeny in test plantations. *Vestnik Instituta Biologii Komi nauchnogo sentra Uralskogo otsteleniya RAN = Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2005;4:19–20. (In Russ.)
- Forest plan of the Republic of Karelia. Approved by the Order of the Head of the Republic of Karelia dated December 24, 2018 No. 731-p. Moscow; 2018. 161 p. (In Russ.)
- Guidelines for forest tree breeding in the Russian Federation. Approved by the Federal Service for Forestry

of the Russian Federation on January 11, 2000. Moscow; 2000. 197 p. (In Russ.)

Haapanen M. Evaluation of options for use in efficient genetic field testing of *Pinus sylvestris* (L.). Finnish Forest Research Institute, Research Papers 826. 2002. 144 p.

Ivanter E. V., Korosov A. V. Introduction to quantitative biology: a study guide. Petrozavodsk: PetrGU; 2003. 304 p. (In Russ.)

Kotov M. M., Lebedeva E. P. Application of statistical methods in forest tree breeding. Gor'kii: GGU; 1977. 119 p. (In Russ.)

Lindgren D. Prediction and optimization of genetic gain with regard to genotype x environment interactions. *Studia Forestalia Suecica*. 1984;166:15–24.

Maslakov E. L. The growth and development of young pine stands. Moscow: Lesn. prom-t'; 1984. 168 p. (In Russ.)

Molotkov P. I., Patlay I. N. The strategy of selection and seed production of Scots pine. *Lesnaya genetika, selektsiya i fiziologiya drevesnykh rastenii = Forest genetics, selection and physiology of woody plants*. Moscow; 1990. P. 9–16. (In Russ.)

Raevsky B. V. Breeding of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm) in the North-West

of Russia: DSc (Dr. of Agr.) thesis. Petrozavodsk; 2015. 43 p. (In Russ.)

Raevsky B. V., Kuklina K. K., Schurova M. L. Genetic and breeding assessment of Scots pine plus trees in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2020;3:45–49. (In Russ.). doi: 10.17076/eb1163

Rogozin M. V. Step test of offspring and a model of accelerated cultivation in forest species. Perm': University; 1990. 11 p. (In Russ.)

Rogozin M. V. Softwood breeding program in the forest seed area. *Sokhranenie lesnykh geneticheskikh resursov Sibiri: Mater. 4-go mezdunar. soveshch. = Conservation of Siberian forest genetic resources. Proceedings of the 4th int. conference*. Barnaul; 2015. P. 150–151. (In Russ.)

Squillace A. E., Gansel Ch. R. Juvenile: Mature correlations in Slash pine. *Forest Sci.* 1974;20(3):225–229.

Tsarev A. P., Laur N. V. Genetic and breeding assessment of Scots pine plus trees. *Lesnoi vestnik = Forest Bulletin*. 2009;1(64):103–108. (In Russ.)

Turkin A. A. Testing progeny of plus trees of Scots pine on the example of the Republic of Komi: Summary of PhD (Cand. of Agr.) thesis. Syktyvkar; 2007. 20 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 24.03.2025; принята к публикации / accepted: 18.06.2025.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Раевский Борис Владимирович

д-р с.-х. наук, заведующий лабораторией лесных биотехнологий

e-mail: borisraevsky@gmail.com

CONTRIBUTOR:

Raevsky, Boris

Dr. Sci. (Agr.), Head of Laboratory