

ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ДРЕВЕСИНЫ В СЕЛЕКЦИОННЫХ ПРОГРАММАХ (КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

А.Л. Федорков

ФГБУН Институт биологии ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения РАН, Россия, 167982, г. Сыктывкар,
ул. Коммунистическая, д. 28

fedorkov@ib.komisc.ru

Представлен обзор современной зарубежной литературы по оценке качественных признаков древесины в селекционных программах. Кратко изложены способы определения плотности древесины с помощью пенетрометра (рабочее название Pilodin) и резистографа различных модификаций. Проведено сравнительное исследование по определению плотности древесины сосны обыкновенной с использованием пенетрометра и резистографа, показавшее, что резистограф дает более точные оценки плотности древесины, чем пенетрометр. Охарактеризован акустический метод определения прочности — важного структурного признака древесины. Отмечена связь между деформативностью древесины и углом наклона волокон, т. е. уровнем спиралевидного отклонения волокон древесины от вертикального положения, который можно определять с помощью клиновидного измерителя, осторожно вбиваемого в ствол растущего дерева. Показано, что угол наклона микрофибрилл целлюлозы является показателем качества древесины. Кратко описан приборный комплекс с программным обеспечением (рабочее название SilviScan), основными компонентами которого являются оптический сканер клеток (определяет размеры волокон и др.), рентгенографический денситометр (профиль плотности и др.) и рентгенографический дифрактометр (микроструктурные признаки). Отмечена незначительная отрицательная взаимосвязь между ростовыми признаками деревьев и качественными признаками древесины, поэтому в ходе реализации селекционных программ рекомендуется проведение индексного отбора. Приведены примеры использования геномного отбора при селекции на качество древесины для таких древесных пород, как сосна обыкновенная, сосна скрученная, ель европейская, ель белая, ель черная и эвкалипт.

Ключевые слова: селекционные программы, древесные породы, качественные признаки древесины, микроструктура древесины

Ссылка для цитирования: Федорков А.Л. Оценка качественных признаков древесины в селекционных программах (краткий обзор современной литературы) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 30–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-30-35

Повышение качества древесины является приоритетной задачей при воспроизводстве лесов [1]. Под качеством древесины обычно понимают совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность удовлетворять потребности в соответствии с назначением. За период 2000–2020 гг. в зарубежной литературе появилось много публикаций, посвященных оценке качества древесины в ходе реализации селекционных программ древесных пород.

Цель работы

Цель работы — краткий обзор литературы по этому вопросу. При проведении анализа литературы внимание было сосредоточено на наследуемости древесиноведческих (по Мелехову и др., [2]) признаков и современном оборудовании по их оценке.

Результаты и обсуждение

При селекции, ориентированной на качество древесины, важной особенностью является необходимость оценки качественных признаков у значительного числа деревьев, относящихся к различным клонам, сибсовым или полусибсовым семьям, географическому происхождению и т. п. При этом возможность рубки модельных деревьев на объектах лесного семеноводства (архивах клонов, испытательных и географических культурах, лесосеменных плантациях и др.) крайне ограничена, поскольку необходимо сохранение деревьев для последующих исследований и размножения.

Плотность часто рассматривается как самый лучший прогнозный показатель качества древесины. Древесина с более высокой плотностью предпочтительна как в строительстве, так и при механической обработке и дает более высокий выход целлюлозы. Для определения плотности древесины у большого числа растущих деревьев

используются переносные приборы: пенетрометр (рабочее название Pilodin) и резистограф различных модификаций [3]. Пенетрометр измеряет плотность древесины по глубине проникновения в нее подпружиненного шипа (глубина проникновения шипа отрицательно коррелирует с плотностью древесины). К недостаткам этого инструмента относится неглубокое проникновение в древесину (плотность определяется только у заболони), низкая чувствительность и необходимость снятия коры, если она толстая. Принцип работы резистографа основывается на сопротивлении сверлению по всему поперечному сечению ствола от коры до коры. Профиль показывает изменчивость плотности по стволу для годичных колец, сердцевины и коры [3].

В Швеции проведено сравнительное исследование по определению плотности древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с использованием пенетрометра и резистографа на 522 растущих деревьях 40-летнего возраста, относящихся к 175 сибсовым семьям [4]. Для контроля авторы использовали данные плотности, полученные по кернам методом рентгенографии на приборном комплексе SilviScan. Контрольное значение коэффициента наследуемости в узком смысле h^2 составило 0,46, значение, рассчитанное по данным резистографа — 0,43 и пенетрометра — 0,32. По завершении исследования авторы пришли к выводу, что резистограф дает более точные оценки плотности древесины, чем пенетрометр.

Для быстрого, автоматического анализа небольших образцов древесины (кернов) был разработан приборный комплекс по принципу «все в одном» с программным обеспечением (рабочее название SilviScan). Основными его компонентами стали оптический сканер клеток (определяет размеры волокон и др.), рентгенографический денситометр (дает профиль плотности и др.) и рентгенографический дифрактометр (микроструктурные признаки). По данным первоначальных измерений с его помощью можно также рассчитать значения других качественных признаков древесины [3].

Прочность — важный структурный признак древесины, который определяет ее использование. Показателем прочности является предел прочности, т. е. максимальная величина напряжения (сжатие, растяжение, изгиб, сдвиг), которую выдерживает образец древесины. У растущих деревьев прочность древесины можно определять акустическим методом. В этом случае прочность древесины рассчитывается как квадратичная скорость распространения звука, умноженная на ее плотность. Скорость звука можно найти по времени прохождения звука через древесину. Этот подход пригоден для оценки прочности древесины

растущих деревьев. Он основан на времени прохождения стрессовой волны, вызванной механическим воздействием между двумя датчиками, акуратно вбитыми в ствол. Зная расстояние между датчиками, можно рассчитать скорость звука как расстояние, деленное на время [5].

Определение плотности древесины с помощью пенетрометра и времени прохождения звука было проведено на 4267 деревьях лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) на 21 участке 25–35-летних культур, заложенных полусибсовыми семьями в Австрии [6]. Оба признака показали высокий уровень генетической детерминации: 0,32...0,61 — для плотности и 0,56 — для скорости звука. По завершении исследования авторы пришли к выводу, что включение показателей качества древесины в селекционную программу лиственницы европейской крайне желательно и для этого имеются надежные инструменты. В Швеции измерения плотности древесины и времени прохождения звука проводили на растущих деревьях 38-летнего возраста в испытательных культурах плюсовых деревьев сосны, после чего рассчитывали предел прочности [7]. При рубках ухода, проводимых коридорным методом, из этих деревьев были получены 496 сортимента длиной 4 м (по одному с дерева), которые были распилены на доски. До распиловки у сортиментов и после распиловки у 496 досок определяли прочность древесины стандартным способом, которая служила в качестве контроля. По результатам этого исследования, оценки прочности древесины, полученные акустическим методом на растущих деревьях, хорошо соответствовали значениям, полученным стандартным способом у сортиментов и пиломатериалов [7].

Деформативность — одно из самых важных свойств пиломатериалов. Различные формы коробления (крыловатость, изгиб, кручение и др.) проявляются после распиловки сортиментов и значительно снижают качество пиломатериалов. Была выявлена связь между углом наклона волокон древесины и короблением пиломатериалов [8–10]. Углом наклона волокон древесины, т. е. спиральностью волокна, называют уровень спиралевидного отклонения волокон древесины от вертикального положения. Ее можно измерять с помощью клиновидного измерителя угла наклона волокон, осторожно вбиваемого в ствол растущего дерева [8]. В южной части Швеции проведено исследование испытательных культур ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), заложенных 115 полносибсовыми семьями (по 40 растений) [11]. В 18-летнем возрасте у растущих деревьев была измерена высота и в 28-летнем возрасте — угол наклона волокон. Затем в 34-летнем возрасте в двух блоках испытательных культур было

срублено 401 дерево (с диаметром ствола на высоте 1,3 м от земной поверхности, превышающем 14 см) с учетом представленности всех семей. Диски брали из вершины комлевых сортиментов и создавали радиальный профиль данных по углу наклона волокон и плотности древесины для определенных годовичных колец. Свежераспиленные и высушенные доски оценивали по структурным признакам, характеризующим изгиб. Аддитивные генетические корреляции между плотностью древесины годовичных колец и плотностью доски были статистически значимы (выше 0,7). Близкие значения были получены и для связи угла наклона волокон и изгиба доски. На этом основании был сделан вывод о возможности проведения отбора по потомству в полевых опытах одновременно по ростовым признакам и признакам качества древесины [11]. Аналогичное исследование проведено и для сосны обыкновенной. Среди признаков, измеряемых у растущих деревьев, угол наклона волокон древесины показал себя как лучший прогнозный показатель кручения и изгиба пиломатериалов (коэффициент корреляции $r = 0,84$ и $0,62$, соответственно). Значения коэффициента наследуемости h^2 для кручения и угла наклона волокон были умеренными ($0,37$ и $0,40$, соответственно), для крыловатости — низкими ($0,21$) и для изгиба — очень низкими. Отбор на низкий угол наклона волокон дал бы в результате снижение кручения и изгиба, но увеличил бы также плотность и прочность [12].

Предметом многочисленных исследований являются и **микроструктурные признаки древесины**. Такие размерные признаки волокон древесины (продольных трахеид), как длина и крупность, толщина стенок определяют в значительной степени качество продукции целлюлозно-бумажной промышленности. Генетическая изменчивость размерных признаков волокон древесины была исследована у интродуцированной древесной породы — сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) в Швеции [13]. Исследование проведено на 823 ядрах, взятых у 207 полусибсовых семей на двух отдельных участках испытательных культур 34–35-летнего возраста с использованием SilviScan. Значения коэффициентов наследуемости составили $0,29 \dots 0,74$ с возрастанием по мере созревания камбия. Возрастная генетическая корреляция показала, что ранний отбор в возрасте от 5 до 8 лет весьма эффективен [13].

В работе Л. Доналдсона [14] показано, что угол наклона микрофибрилл целлюлозы (*microfibril angle*, MFA), т. е. отклонение микрофибрилл целлюлозы в клеточной оболочке от продольной оси клетки, является показателем качества целлюлозы и бумаги. Генетический контроль MFA

оценен у ели европейской и сосны скрученной с использованием SilviScan по ядрам, взятым у 5664 деревьев на двух 21-летних участках испытательных культур ели европейской в южной части Швеции и двух 34–35-летних участках сосны скрученной в ее северной части [15]. Значения коэффициента наследуемости в узком смысле h^2 варьировали от $0,21$ до $0,23$ у ели и от $0,34$ до $0,53$ у сосны скрученной. Результаты данного исследования показали, что возможен отбор по MFA у ели и сосны скрученной, так как генетическое улучшение (эффект селекции) по этому признаку является высоким для обеих пород [15].

Древесина состоит из четырех основных химических соединений: целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и экстрактивных веществ. При условии, что **признаки химического состава** наследуются и показывают достаточную генетическую изменчивость, они могут быть включены в селекционные программы древесных пород как целевые признаки и улучшены посредством повторного отбора. Для целлюлозно-бумажной промышленности требуется более плотная древесина с длинными волокнами, меньшим содержанием лигнина и экстрактивных веществ. Для быстрого и недорогого химического анализа небольших образцов древесины (ядров), взятых у растущих деревьев, наиболее подходит метод инфракрасной спектроскопии с использованием SilvaScan. Метод был опробован на 1245 деревьях сосны, отобранных в культурах полносибсовых семей в северной части Швеции [16]. Из основных химических компонентов древесины самые высокие значения коэффициента наследуемости в узком смысле наблюдались для содержания гемицеллюлозы ($0,43 \dots 0,47$), средние — для содержания лигнина и экстрактивных веществ ($0,30 \dots 0,39$) и самые низкие — для целлюлозы ($0,20 \dots 0,25$). Корреляция признаков, характеризующих химический состав с ростовыми признаками, была близка к нулю.

При проведении селекции [17] важно учитывать взаимосвязь между ростовыми признаками и признаками качества древесины, в частности незначительную отрицательную корреляцию между ростом по диаметру ствола и прочностью древесины у сосны скрученной, поэтому рекомендуется проведение индексного отбора. Кроме того, отрицательная взаимосвязь между прочностью древесины и выходом целлюлозы у этой древесной породы свидетельствует о том, что селекционная стратегия должна быть направлена на улучшение качества древесины для различного использования [13]. Для сосны обыкновенной также рекомендуется индексный отбор как компромисс для одновременного улучшения признаков роста, волокон и качества древесины [18].

В последние два десятилетия лесные селекционеры начали активно применять геномный отбор с использованием маркеров ДНК, что значительно сокращает селекционный процесс. Наряду с ростовыми признаками (высотой, диаметром и объемом ствола) признаки качества древесины (плотность, прочность и MFA) включены в селекцию сосны обыкновенной и ели европейской в Швеции [19, 20], сосны скрученной, ели белой и ели черной в Канаде [21–23], эвкалипта в Бразилии и Новой Зеландии [24, 25] и в других странах.

Выводы

Завершая краткий обзор современной зарубежной литературы, резюмируем, что признаки качества древесины активно включаются в селекционные программы древесных пород. Наблюдаемая в отдельных случаях отрицательная корреляция между ростовыми признаками и признаками качества древесины может быть нивелирована применением индексного отбора плюсовых деревьев для дальнейшей селекции.

Список литературы

- [1] Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А., Щекалев Р.В. Комплексная оценка качества древесины сосны в лесных культурах разных условий местопроизрастания // Лесоведение, 2021, № 2. С. 208–210. DOI: 10.31857/S0024114821020054
- [2] Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качественные характеристики древесины сосны в культурах. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. университета, 2005. 142 с.
- [3] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation // Forests, 2019, v. 10, pp. 1–50. DOI:10.3390/f10090728
- [4] Fundova I., Funda T., Wu H.X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using resistograph and pilodyn // PLoS ONE, 2018, v. 13, no. 9, e0204518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- [5] Fundova I. Quantitative Genetics of Wood Quality Traits in Scots Pine. PhD Thesis // Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2020, no. 9, p. 59.
- [6] Škorpik P., Konrad H., Geburek T., Schuh M., Vasold D., Eberhardt M., Schueler S. Solid wood properties assessed by non-destructive measurements of standing European larch (*Larix decidua* Mill.): environmental effects on variation within and among trees and forest stands // Forests, 2018, no. 9, pp. 1–20. doi:10.3390/f9050276
- [7] Fundova I., Hallingbäck H.R., Jansson G., Wu H.X. Genetic improvement of sawn board stiffness and strength in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) // Sensors, 2020a, v. 20, no. 4. DOI:10.3390/s20041129
- [8] Hannrup B., Säll H., Jansson G. Genetic parameters for spiral grain in Scots pine and Norway spruce // Silvae Genetica, 2003, v. 52, no. 5–6, pp. 215–220.
- [9] Hallingbäck H. R., Jansson G., Hannrup B. Genetic parameters for grain angle in 28-year-old Norway spruce progeny trials and their parent seed orchard // Annals of Forest Science, 2008, v. 65, no. 3, p. 301. <https://doi.org/10.1051/forest:2008005>
- [10] Högberg K.-A., Persson B., Hallingbäck H. R. & Jansson G. Relationships between early assessments of stem and branch properties and sawn timber traits in a *Pinus sylvestris* progeny trial // Scandinavian J. of Forest Research, 2010, v. 25, no. 5, pp. 421–431.
- [11] Hallingbäck H.R., Högberg K.-A., Säll H., Lindeberg J., Johansson M., Jansson G. Optimal timing of early genetic selection for sawn timber traits in *Picea abies* // European J. of Forest Research, 2018, v. 137, no. 4, pp. 553–564. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1123-2>
- [12] Fundova I., Hallingbäck H.R., Jansson G., Wu H.X. Genetic improvement of sawn-board shape stability in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // Industrial Crops and Products, 2020, v. 157, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112939>
- [13] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber-dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*) // Canadian J. of Forest Research, 2019, v.49, pp. 500–509. <dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0445>
- [14] Donaldson L. The use of pit apertures as windows to measure microfibril angle in chemical pulp fibers // Wood Fiber Science, 2007, v. 23, no. 2, pp. 290–295.
- [15] Hayatgheibi H., Forsberg N-E., Lundqvist S-O., Mörling T., Mellerowicz E.J., Karlsson B., Wu H.X., García-Gil M.R. Genetic control of transition from juvenile to mature wood with respect to microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*) // Canadian J. of Forest Research, 2018, v. 48, pp. 1–8. <dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0140>
- [16] Funda T., Fundová I., Fries A., Wu H.X. Genetic improvement of the chemical composition of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) juvenile wood for bioenergy production // GCB Bioenergy, 2020, v. 12, pp. 848–863. DOI: 10.1111/gcbb.12723
- [17] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of lodgepole pine (*Pinus contorta*) solid-wood quality traits // Canadian J. of Forest Research, 2017, v. 47, pp. 1303–1313. <dx.doi.org/10.1139/cjfr-2017-0152>
- [18] Fundova I., Funda I., Wu H. X. Non-destructive assessment of wood stiffness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and its use in forest tree improvement // Forests, 2019, v. 10, no. 6, pp. 1–15.
- [19] Calleja-Rodriguez A., Pan J., Funda T., Chen Z-Q., Baisson J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data // BioRxiv, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>
- [20] Chen Z-Q., Baisson J., Pan B., Karlsson B., Andersson B., Westin J., García-Gil M-R., Wu H. X. Accuracy of genomic selection for growth and wood quality traits in two control-pollinated progeny trials using exome capture as the genotyping platform in Norway spruce // BMC Genomics, 2018, v. 19, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5256-y>
- [21] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models // Tree Genet. Genomes, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [22] Beaulieu J., Doerksen T.K., MacKay J., Rainville A., Bousquet J. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce // BMC Genomics, 2014, v. 15, pp. 1–16. <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/15/1048>

- [23] Lenz P.R.N., Beaulieu J., Mansfield S.D., Clément S., Despots M., Bousquet J. Factors affecting the accuracy of genomic selection for growth and wood quality traits in an advanced-breeding population of black spruce (*Picea mariana*) // BMC Genomics, 2017, no. 18, pp. 1–17. DOI: 10.1186/s12864-017-3715-5
- [24] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories // Heredity, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [25] Tan B.D., Grattapaglia G.S., Martins K.Z., Ferreira B., Sundberg B., Ingvarsson P.K. Evaluating the accuracy of genomic prediction of growth and wood traits in two Eucalyptus species and their F₁ hybrids // BMC Plant Biol., 2017, no. 17, p. 110. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1059-6>

Сведения об авторе

Федорков Алексей Леонардович — д-р. биол. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт биологии ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения РАН, fedorkov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 04.05.2022.

Одобрено после рецензирования 30.06.2022.

Принята к публикации 16.11.2022.

WOOD QUALITY ESTIMATION IN TREE BREEDING PROGRAMMES (SHORT LITERATURE REVIEW)

A.L. Fedorkov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya st., 167982, Syktyvkar, Russia

fedorkov@ib.komisc.ru

The literature review concerning wood quality traits measuring in forest tree breeding programs is given. Methods of wood density measuring by Pilodyn and different types of Resistograph are shortly described. Comparison study to measure Scots pine wood density by Pilodyn and Resistograph revealed that Resistograph provide more precise wood density data than Pilodyn. Method of measuring of wood stiffness an important wood mechanical property using acoustic velocity data is characterized. There is relationship between distortion of lumber and grain angle of wood fibers. Grain angle, i.e. spiral grain, refers to the degree of helical deviation from longitudinal arrangement of wood fibers. It can be measured with a wedge grain angle gauge hammered into a stem of a standing tree. It is shown, that microfibril angle (MFA), referring to the deviation of cellulose microfibrils in the layer of the secondary cell wall from the long axis of cell, is the main determinant of the mechanical properties of wood. There is shortly described the system of instruments with linked software (SilviScan), the main components of this system are optical cell scanner (for measurement of fiber size), X-ray densitometer (density profile and others) and X-ray diffractometer (microstructure traits). A minor negative relationship between growth and wood quality traits is noted, so the index selection is recommended under realization of tree breeding program. Some examples of genomic selection in tree breeding programs for wood quality are given.

Keywords: tree breeding programs, tree species, wood quality traits, wood microstructure

Suggested citation: Fedorkov A.L. *Otsenka kachestvennykh priznakov drevesiny v selektsionnykh programmakh (kratkiy obzor sovremennoy literatury)* [Wood quality estimation in tree breeding programmes (short literature review)]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 30–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-30-35

References

- [1] Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A., Shchekalev R.V. *Kompleksnaya otsenka kachestva drevesiny sosny v lesnykh kul'turakh raznykh usloviy mestoproizrastaniya* [Integrated evaluation of Scots pine wood quality in forest plantations in different local conditions]. Lesovedenie [Rus. J. For. Sci.], 2021, no. 2, pp. 208–210.
- [2] Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Kachestvennye kharakteristiki drevesiny sosny v kul'turakh* [Characteristics of Scots pine wood quality in plantations]. Arhangel'sk: Izd-vo Arhangel'skogo Gos. Tekh. Universiteta, 2005, 142 p
- [3] Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J., Wang X. Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. Forests, 2019, v. 10, p. 1–50. doi:10.3390/f10090728
- [4] Fundova I., Funda T., Wu H. X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using resistograph and pilodyn. PLoS ONE, 2018, v. 13, no. 9, e0204518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518>
- [5] Fundova I. Quantitative Genetics of Wood Quality Traits in Scots Pine. PhD Thesis. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2020, no. 9, p. 59.

- [6] Škorpík P., Konrad H., Geburek T., Schuh M., Vasold D., Eberhardt M., Schueler S. Solid wood properties assessed by non-destructive measurements of standing European larch (*Larix decidua* Mill.): environmental effects on variation within and among trees and forest stands. *Forests*, 2018, no. 9, pp.1–20. doi:10.3390/f9050276
- [7] Fundova I., Hallingbäck H.R., Jansson G., Wu H.X. Genetic improvement of sawn board stiffness and strength in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Sensors*, 2020a, v. 20, no. 4, pp.1–19. DOI:10.3390/s20041129
- [8] Hannrup B., Säll H., Jansson G. Genetic parameters for spiral grain in Scots pine and Norway spruce. *Silvae Genetica*, 2003, v. 52, no. 5–6, pp. 215–220.
- [9] Hallingbäck H. R., Jansson G., Hannrup B. Genetic parameters for grain angle in 28- year-old Norway spruce progeny trials and their parent seed orchard. *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65, no. 3, p. 301. <https://doi.org/10.1051/forest:2008005>
- [10] Högborg K.-A., Persson B., Hallingbäck H. R. & Jansson G. Relationships between early assessments of stem and branch properties and sawn timber traits in a *Pinus sylvestris* progeny trial. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2010, v. 25, no. 5, pp. 421–431.
- [11] Hallingbäck H.R., Högborg K.-A., Säll H., Lindeberg J., Johansson M., Jansson G. Optimal timing of early genetic selection for sawn timber traits in *Picea abies*. *European J. of Forest Research*, 2018, v. 137, no. 4, pp. 553–564. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1123-2>
- [12] Fundova I., Hallingbäck H.R., Jansson G., Wu H.X. Genetic improvement of sawn-board shape stability in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Industrial Crops and Products*, 2020, v. 157, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112939>
- [13] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of fiber-dimension traits and combined selection for simultaneous improvement of growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*). *Canadian J. of Forest Research*, 2019, v.49, pp. 500–509. dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0445
- [14] Donaldson L. The use of pit apertures as windows to measure microfibril angle in chemical pulp fibers. *Wood Fiber Science*, 2007, v. 23, no. 2, pp. 290–295.
- [15] Hayatgheibi H., Forsberg N-E., Lundqvist S-O., Mörling T., Mellerowicz E.J., Karlsson B., Wu H.X., Garcia-Gil M.R. Genetic control of transition from juvenile to mature wood with respect to microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*) and lodgepole pine (*Pinus contorta*). *Canadian J. of Forest Research*, 2018, v. 48, pp. 1–8. dx.doi.org/10.1139/cjfr-2018-0140
- [16] Funda T., Fundová I., Fries A., Wu H.X. Genetic improvement of the chemical composition of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) juvenile wood for bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 2020, v. 12, pp. 848–863. DOI: 10.1111/gcbb.12723
- [17] Hayatgheibi H., Fries A., Kroon J., Wu H.X. Genetic analysis of lodgepole pine (*Pinus contorta*) solid-wood quality traits. *Canadian J. of Forest Research*, 2017, v. 47, pp. 1303–1313. dx.doi.org/10.1139/cjfr-2017-0152
- [18] Fundova I., Funda I., Wu H. X. Non-destructive assessment of wood stiffness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and its use in forest tree improvement. *Forests*, 2019, v. 10, no. 6, pp. 1–15.
- [19] Calleja-Rodriguez A., Pan J., Funda T., Chen Z-Q., Baison J., Isik F., Abrahamsson S., Wu H.X. Genomic prediction accuracies and abilities for growth and wood quality traits of Scots pine, using genotyping-by-sequencing (GBS) data. *BioRxiv*, 2019. <http://dx.doi.org/10.1101/607648>
- [20] Chen Z-Q., Baison J., Pan B., Karlsson B., Andersson B., Westin J., García-Gill M-R., Wu H. X. Accuracy of genomic selection for growth and wood quality traits in two control-pollinated progeny trials using exome capture as the genotyping platform in Norway spruce. *BMC Genomics*, 2018, v. 19, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5256-y>
- [21] Ukrainetz N.K., Mansfield S.D. Assessing the sensitivities of genomic selection for growth and wood quality traits in lodgepole pine using Bayesian models. *Tree Genet. Genomes*, 2020, v. 16, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1404-z>
- [22] Beaulieu J., Doerksen T.K., MacKay J., Rainville A., Bousquet J. Genomic selection accuracies within and between environments and small breeding groups in white spruce. *BMC Genomics*, 2014, v. 15, pp. 1–16. <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/15/1048>
- [23] Lenz P.R.N., Beaulieu J., Mansfield S.D., Clément S., Despots M., Bousquet J. Factors affecting the accuracy of genomic selection for growth and wood quality traits in an advanced-breeding population of black spruce (*Picea mariana*). *BMC Genomics*, 2017, no. 18, pp. 1–17. DOI: 10.1186/s12864-017-3715-5
- [24] Suontama M., Klápště J., Telfer E., Graham N., Stovold T., Low C., McKinley R., Dungey H. Efficiency of genomic prediction across two *Eucalyptus nitens* seed orchards with different selection histories. *Heredity*, 2019, v. 122, pp. 370–379. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0119-5>
- [25] Tan B.D., Grattapaglia G.S., Martins K.Z., Ferreira B., Sundberg B., Ingvarsson P.K. Evaluating the accuracy of genomic prediction of growth and wood traits in two *Eucalyptus* species and their F₁ hybrids. *BMC Plant Biol.*, 2017, no. 17, p. 110. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1059-6>

Author information

Fedorkov Aleksey Leonardovich — Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher of the Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, fedorkov@ib.komisc.ru

Received 04.05.2022.

Approved after review 30.06.2022.

Accepted for publication 16.11.2022.