

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕН-СКАНИРОВАНИЯ И БИОМЕТРИЧЕСКОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ
СЫРЬЯ В ЛЕСОПИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**
**APPLICATION OF X-RAY SCANNING AND BIOMETRIC
IDENTIFICATION OF WOOD FOR END-TO-END CONTROL OF RAW
MATERIALS IN MANUFACTURE OF SAWN TIMBER**

Лучинский М.В., студент

Стариков А.В., д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет

имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

luchinskym@gmail.com

Luchinsky M.V., Student

Starikov A.V., DSc (Engineering), Professor

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: В статье рассматривается технология использования набора уникальных параметров брёвен, образно называемых «отпечатками» древесины (wood fingerprint), для использования в системе сквозного контроля пиловочных лесоматериалов на всех технологических участках лесопильного производства. Изложены принципы работы данной технологии, реализованной финской компанией Finnos Oy, активно внедряемой на зарубежных и отечественных лесопильных предприятиях.

Summary: The article discusses the technology of using a set of unique log parameters, figuratively called «wood fingerprints», for use in a system of end-to-end control of sawn timber at all technological sections of sawmill production. The principles of operation of this technology, implemented by the finnish company Finnos Oy, actively implemented at foreign and domestic sawmills, are presented.

Ключевые слова: контроль брёвен, «отпечаток» древесины, биометрическая идентификация древесины, пиломатериалы, лесопильное производство, рентгеновское сканирование.

Keywords: timber control, wood fingerprint, biometric wood identification, sawn timber, sawmill, x-ray scanning.

Введение

Лесопильные заводы играют ключевую роль в цепочке поставок изделий из древесины, оказывая огромное влияние на себестоимость готовой продукции.

На рисунке 1 показана цепочка поставок изделий из древесины, которая помимо прочего включает в себя и сложное лесопильное производство, состоящее из множества технологических участков.

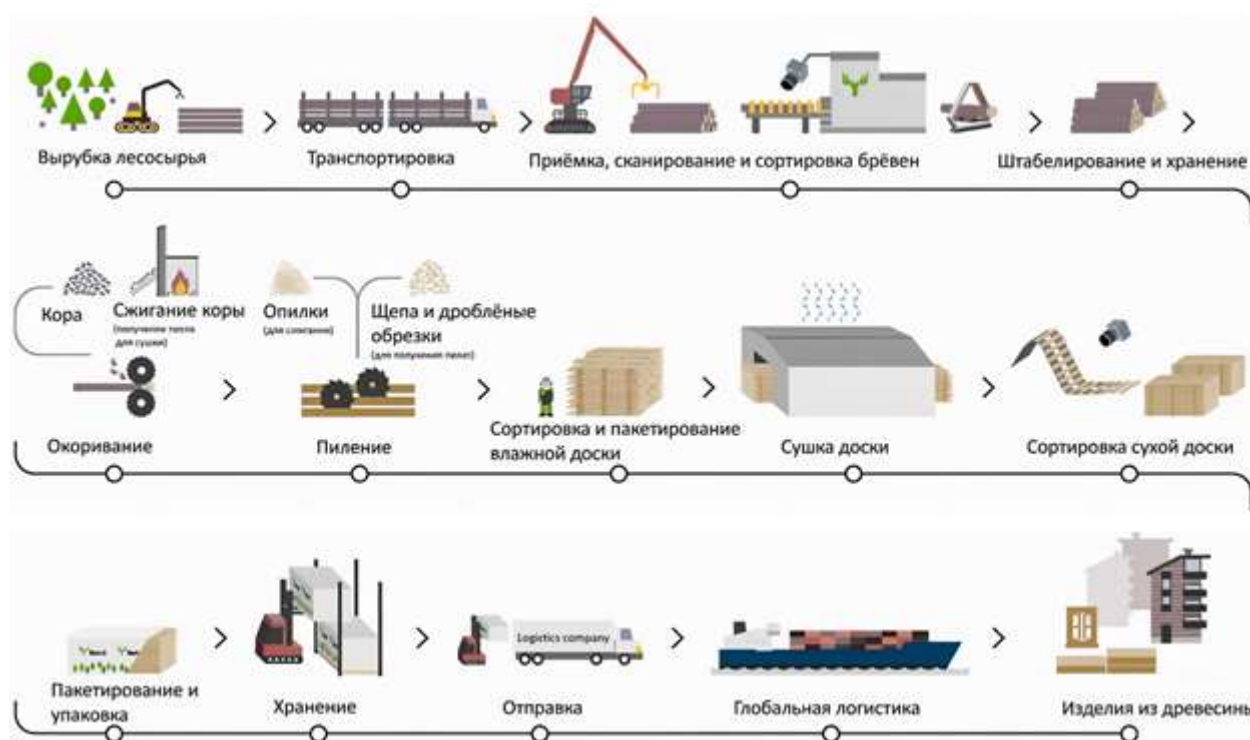


Рисунок 1 – Цепочка поставок изделий из древесины

С повышением стоимости сырья и усилением контроля за оборотом леса, на современных лесопильных комплексах возрастают требования к увеличению эффективности переработки лесоматериалов. Ключевым показателем любого лесопильного производства является процент выхода пиломатериала по сортаментам. Для достижения высоких показателей требуется постоянно улучшение производственных процессов за счёт оптимального выбора пильных поставов, корректного подбора сырья в производство и тщательной работы с лесхозами, поставляющими пиловочные материалы.

С целью улучшения бизнес-процессов поточных линий лесопиления, сушки и сортировки досок, требуется собирать как можно больше информации по каждому переделу сырья. Современные лесопильные комплексы снабжаются системами планирования и анализа данных для прогнозирования поступлений сырья на основании статистики по лесхозам, а также прогнозирования выхода пиломатериала по сортам. Ключевой проблемой, ограничивающей развитие информационных систем лесопильных предприятий, становится невозможность однозначно сопоставить данные по входящему сырью с данными по выходящей готовой продукции. После сортировки брёвен при приёмке на склад лесосырья, весь пиловочник укладывается в штабели, в которых сырьё от разных поставщиков смешивается и далее отправляется в цех лесопиления. В силу специфики процесса подбора брёвен из штабелей, отправка сырья в цех лесопиления, как правило, происходит по принципу LIFO (LastIn, FirstOut – последним пришёл, первым вышел), что также увеличивает риск возникновения залежалого пиловочника на складе. Таким образом, любой анализ себестоимости или качества производственных процессов будет базироваться только на усреднённых данных, пока не появится возможность обеспечить однозначную идентификацию каждого бревна на этапе приёмки от лесхоза, а также на этапе передачи брёвен со склада лесосырья в цех лесопиления.

Для обеспечения идентификации брёвен на предприятиях применяют различные способы, имеющие как преимущества, так и недостатки. В частности, широко используются следующие способы:

- ручная нумерация (маркирование) каждого бревна краской;
- прибивание к каждому бревну многоцветных металлических бирок;
- приклеивание RFID-меток на каждое бревно.

Указанные способы идентификации либо полностью несовместимы с автоматизированными процессами крупных лесопильных производств, либо требуют усложнения процессов. Кроме того, указанные методы подвержены ошибкам в случае потери или порчи нанесённого на бревно средства идентификации.

Суть любого метода, обеспечивающего сквозной контроль пиломатериалов, сводится к необходимости присвоить каждому экземпляру сырья уникальное цифровое значение. При этом, являясь природным сырьём, брёвна изначально наделены огромным количеством свойств, позволяющим определить уникальность каждого конкретного экземпляра, необходимо лишь получить и систематизировать эти данные в цифровом виде [1].

Современные технологии компьютерного зрения, объёмного лазерного сканирования и автоматизированного рентген-сканирования, входящие в состав автоматических линий сортировки лесопильного завода, позволяют сразу же при поступлении лесоматериалов от поставщика, получать следующую информацию о каждом бревне:

- форма бревна (полная 3D-модель);
- плотность его древесины;
- количество, положение и форма сучков в бревне;
- изображения торцов бревна.

Если все указанные информационные элементы свести в уникальный «биометрический паспорт» конкретного бревна (рисунок 2), то появляется возможность отследить его движение по всем переделам лесопильного производства со степенью достоверности, стремящейся к 100 %.

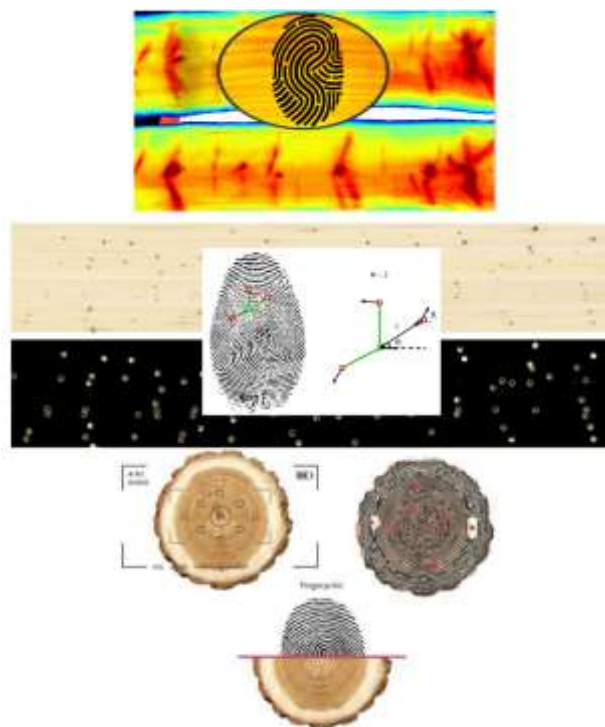


Рисунок 2 – Наглядное представление комбинации уникальных элементов, составляющих «биометрический паспорт» бревна

Опыт финских предприятий, внедривших технологию идентификации «отпечатка» древесины на уровне брёвен, показывает, что она позволяет радикально изменить подход к лесопилению, переходя от массовой поточной линии с усреднёнными показателями к индивидуальному проекту распила каждого бревна без снижения скорости работы линии лесопиления и производительности предприятия в целом. Подобный подход позволяет поднять доходность лесопильных предприятий на новый уровень.

Ниже излагаются принципы работы технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint) при обработке брёвен, описывается её реализация на базе современных многосенсорных сканеров Finnos Fusion, приводится схема присвоения уникального идентификатора конкретному бревну для его отслеживания на всех стадиях лесопильного производства. Также обсуждаются практические результаты применения таких систем и ожидаемый эффект от её внедрения в рамках концепции «умного» завода, отвечающей вызовам четвёртой промышленной революции – Индустрии 4.0.

Принципы технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint)

Концепция технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint) базируется на том факте, что древесина – это природный биологический материал, каждый экземпляр которого уникален. Даже при одинаковой породе и месте произрастания два дерева не будут идентичными: различаются рисунки годовичных колец, количество и расположение сучков, форма ствола, на которую влияют ветровые нагрузки и условия роста, кроме того, плотность древесины варьируется по сечению и длине ствола. Эти особенности можно рассматривать как биометрические признаки конкретного бревна. Исследователи отмечают, что если достаточно точно измерить такой набор признаков, то можно с высокой степенью точности отличить любое взятое бревно от всех остальных и узнавать его при повторном сканировании, аналогично тому как отпечатки пальцев используются для идентификации людей.

Развитие данного направления исследований началось в 2000-х годах. В работе [2] была предложена методика использования машинного зрения для опознания «отпечатка» древесины на изображении торца спила. В совокупности с данными по конусности бревна и его параметрами кривизны, данный метод позволял достигнуть высоких показателей идентификации (порядка 70 % верных обнаружений). В дальнейшем данная методика была расширена идеей K-plets, сведения о которой, содержащиеся в работе [3], были получены в рамках исследований по идентификации человеческих отпечатков пальцев. Суть этой идеи сводится к выявлению на трёхмерной модели бревна местоположения всех сучков и сопоставлению их положения относительно друг друга для формирования набора векторов, создающих уникальный цифровой набор для каждого бревна.

Параллельно с развитием технологий трёхмерного сканирования геометрии и машинного зрения, финская компания FinnosOy стала продвигать идею использования рентген-сканеров на сортировочных линиях лесопильных заво-

дов с целью обнаружения скрытых дефектов древесины и более точного определения диаметров древесины под корой. С развитием и внедрением технологии рентген-сканирования на реальных производствах [4, 5] стало понятно, что рентгеновский снимок каждого бревна позволяет получить ещё больше данных для уникальной идентификации брёвен. Таким образом, была предложена технология LogFingerprint (англ. «отпечаток» бревна), которая совмещала в себе сбор и анализ всех приведённых признаков для каждого бревна, на основании которых создавался набор цифровых векторов, создающих уникальный «биометрический паспорт» для каждого бревна, прошедшего через сканер.

Анализ трёхмерной модели бревна

Первый из векторов данных, представленных в «отпечатке» бревна – трёхмерная модель бревна. Задача сводится к созданию вектора признаков, которые можно быстро сохранить в базе данных, а также произвести по ним оптимизированный поиск, позволяющий создать выборку небольшого массива данных для ускоренного поиска по остальным соответствиям. При трёхмерном сканировании бревна в соответствии с действующими настройками лесопильного производства, эксплуатирующего трёхмерный сканер, для каждого бревна определяются:

- диаметр вершинной части бревна (возможны варианты от 14 до 50 см с шагом до 0,1 см, чаще применяется диапазон 14...36 см с шагом в 1 см в соответствии с рекомендациями ГОСТ 32594-2013 [6]);
- диаметр комлевой части бревна (возможные вариации аналогичны вершинной части);
- точная длина бревна (в нашей стране чаще всего применяется классификация 4 и 6 метров, при этом в базу данных длина записывается с точностью до 1 мм);
- конусность;
- % кривизны;
- цилиндричность и сферичность.

Все указанные составляющие записываются в вектор поиска, позволяющий упростить подбор и извлечение данных по конкретному бревну. Помимо вектора поиска, для каждого бревна сохраняется трёхмерная модель, представляющая набор точек контура, сохранённых в виде массива в базе данных.

Анализ паттернов торца бревна

Для каждого бревна производится фиксация изображения каждого из торцов. Затем выполняется обработка изображения для извлечения данных поверхностного поиска и данных для глубокого анализа.

На первом этапе обработки изображения автоматически удаляется фон и создаётся изображение профиля бревна. Далее для изображения профиля рассчитывается геометрический центр профиля (рисунок 3) [7].

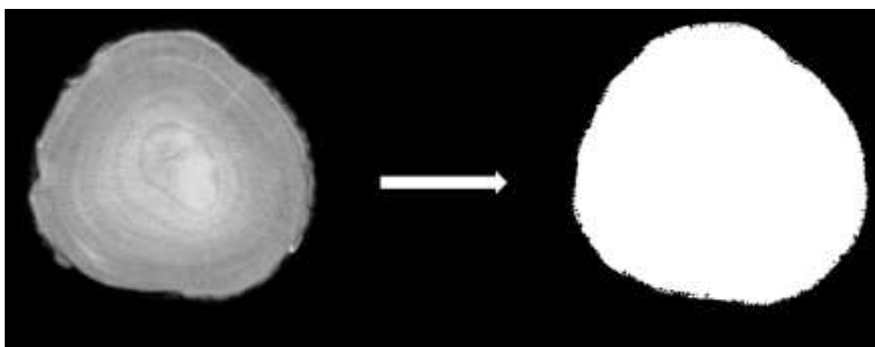


Рисунок 3 – преобразование изображения к паттерну профиля бревна

Геометрический центр изображения можно определить как центр масс плоской области G с координатами:

$$T = \left(\frac{S_y}{m}, \frac{S_x}{m} \right),$$
$$m = \iint_G f(x, y) dx dy;$$
$$S_x = \iint_G y f(x, y) dx dy;$$
$$S_y = \iint_G x f(x, y) dx dy;$$

где T – точка геометрического центра изображения;

S_x, S_y – статистические моменты распределения пикселей вдоль осей x и y соответственно;

m – суммарная масса области, равная интегралу всех значений функции $f(x, y)$, которые в данном случае равны единице для белых пикселей и нулю для всех остальных.

На основании полученного изображения паттерна, можно осуществлять ускоренный поиск соответствий даже в большой базе данных при помощи нейросетевых алгоритмов. Исследования, проведённые в IEEE в 2020 году [8], показывают, что наиболее эффективным способом подбора и распознавания изображений профиля является применение нейросети модели inception-v3, позволяющей за минимальное время поиска получить точность распознавания

бревна 98,45 %, что в сочетании с ранее проведённой выборкой набора брёвен по геометрическим параметрам позволяет свести время поиска уникального идентификатора бревна до долей секунды, а точность результатов приблизить к 100 %.

Однако, помимо точности распознавания бревна, технология «отпечатка» древесины также предполагает развитие возможностей поиска соответствий готового пиломатериала изначальному бревну, из которого он был получен (рисунок 4), что позволяет вывести аналитику производства и контроль качества на принципиально новый уровень.

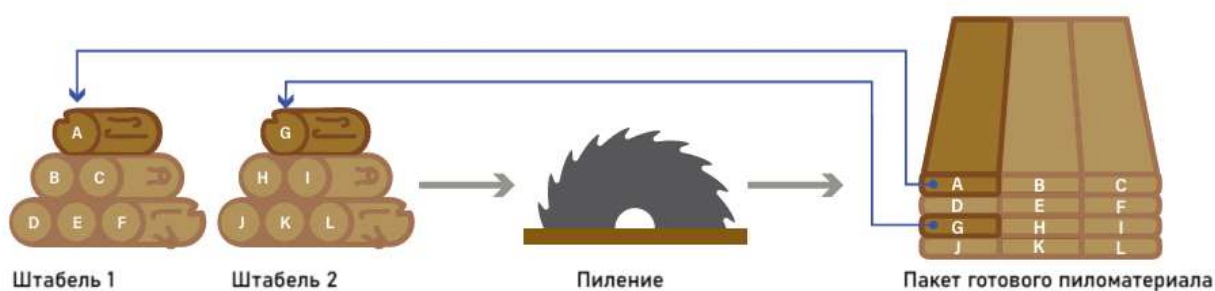


Рисунок 4 – Схематичное представление идентификации соответствия досок исходному лесоматериалу

Для достижения этой цели выполняется дальнейший анализ изображения профиля бревна. Полученный профиль торца бревна делится на сегменты [9], для каждого из которых регистрируется свой набор уникальных показателей (рисунок 5), состоящих из формы годичных колец.

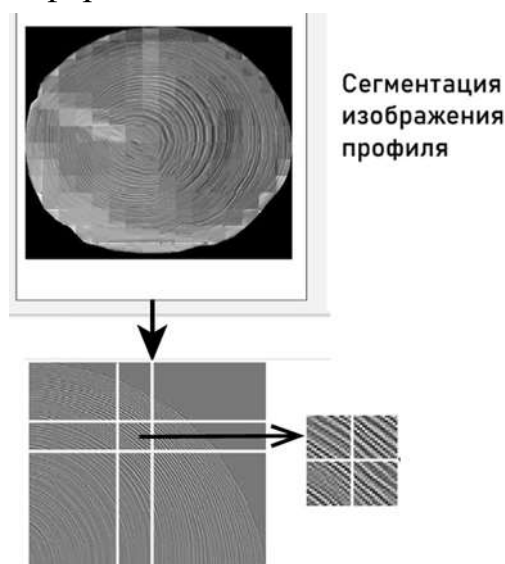


Рисунок 5 – Получение уникальных «отпечатков» древесины по сегментам профиля торца бревна

В дальнейшем эти данные будут использоваться в качестве одного из признаков для верификации соответствия доски и бревна, из которого она по-

лучена. Однако поиск лишь по сегментам профиля торцов брёвен в случае реальной лесопильной линии не эффективен, поскольку потребуются анализировать огромное количество данных, что занимает продолжительное время, а также не позволяет достигнуть высокого уровня точности подбора. Для преодоления данного препятствия было разработано ещё одно решение, основанное на анализе состава древесины, количества и формы входящих в неё сучков.

Анализ состава древесины, количества и положения сучков

Как отмечалось выше, появление на линиях сортировки современных лесопильных комплексов технологий рентген-сканирования, открыло новые возможности по идентификации брёвен. По сути, данная технология стала решающей для обеспечения возможности с практически 100 % точностью за доли секунды не только идентифицировать повторно ранее просканированное на приёмке бревно, но и определить какая доска была из него получена.

Для возможности быстрого поиска бревна, из которого произведена та или иная доска, а также подтверждения точности подбора бревна при входе в цех лесопиления, анализируется два фактора: карта плотности древесины внутри бревна и карта положения сучков (по методу K-plets) [10].

Карта плотности бревна, получаемая с помощью рентген-сканирования, является не только отличным инструментом для анализа качества сырья и прогнозирования выхода сортаментов готового пиломатериала, но и хорошим техническим средством для автоматической идентификации бревна (рисунок 6).

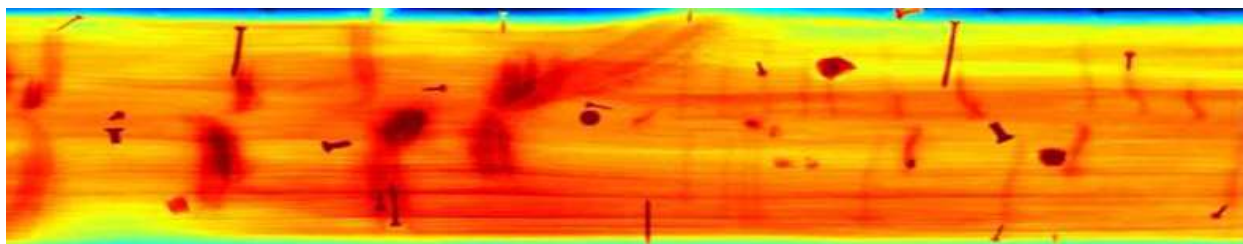


Рисунок 6 – Карта плотности бревна

Карта плотности бревна отображается на экране монитора в виде цветного изображения, на котором участки, поглощающие больше рентгеновского излучения, представлены в более темных и красных цветах. На самом же деле, рентгеновский снимок представляет собой изображение в оттенках серого цвета, сохраняемое 8-битовом формате (градация оттенков серого цвета от 0 до 255). Изображение каждого бревна сохраняется в виде массива в формате хранения матриц NumPy. При поиске соответствий в базе данных используется метод структурного сходства изображений SSIM (Structure Similarity Index Metric)

и для найденных соответствий производится попиксельное сравнение методом вычисления среднеквадратичных ошибок, или MSE (Mean Squared Error).

Помимо карты плотности, рентгеновский снимок позволяет определить в бревне количество сучков, их положение и ориентацию. Данный набор является абсолютно уникальным для каждого бревна и является одним из ключевых способов поиска и подбора соответствий между брёвнами, а также между досками и брёвнами, из которых доски были получены [10] (рисунок 7).

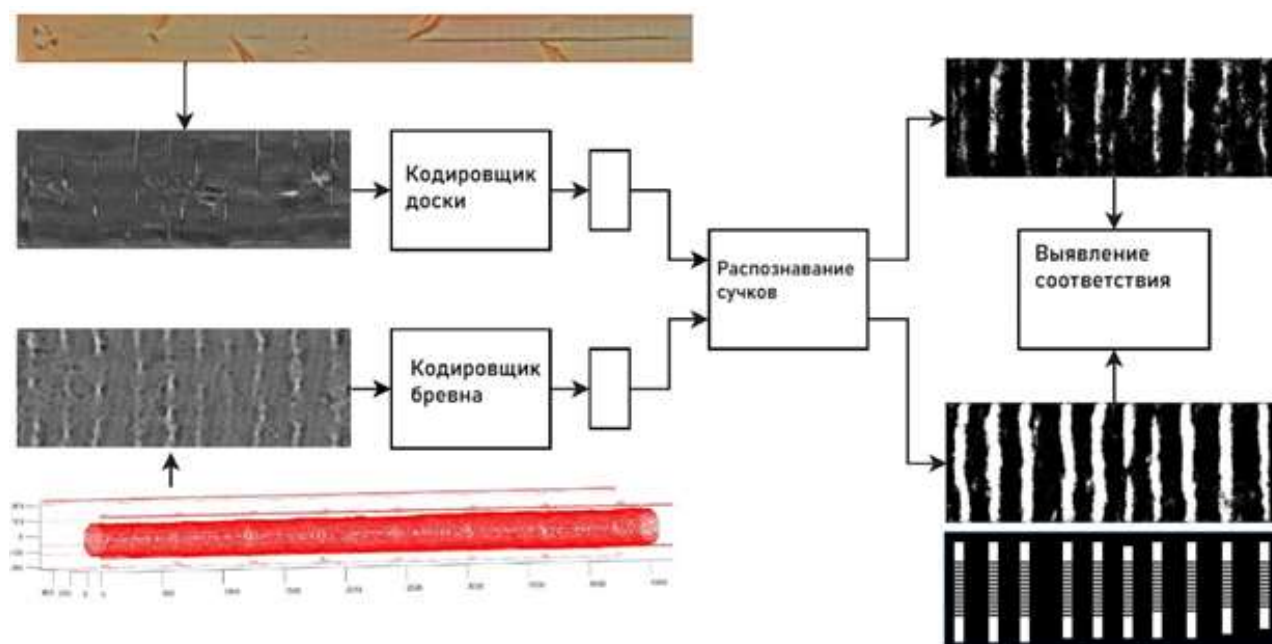


Рисунок 7 – Сопоставление данных о сучках в доске с данными о сучках в бревне

Суть метода сводится к созданию карты расположения сучков из полученного изображения готовой доски и сопоставления данной карты с картами, полученными при рентген-сканировании брёвен [10] (рисунок 8).

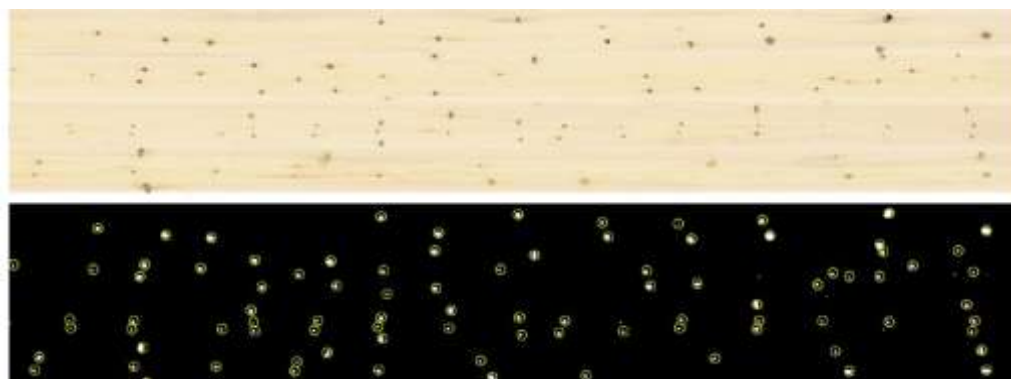


Рисунок 8 – Карта расположения сучков на доске

Расположение сучков относительно друг друга для каждого бревна уникально, как и расположение минюций (так называют окончания или ветвления папиллярных линий) на пальцах человека [11]. Таким образом, можно исполь-

зовать те же самые алгоритмы, которые применяются для машинного опознавания человеческих отпечатков пальцев. Одним из ключевых методов, адаптированных для сопоставления карт расположения сучков, является алгоритм K-plets, упоминавшийся ранее. В основе этого подхода лежит идея выделения и сравнения характерных точек (plets) на карте сучков, аналогично тому, как в дактилоскопии выделяются минюции. Метод K-plets основан на следующих принципах:

1. Выделение характерных точек (plets). На карте расположения сучков определяются характерные точки, такие как центры сучков или точки пересечения линий, соединяющих центры соседних сучков.
2. Описание окрестностей характерных точек (plets): для каждой характерной точки формируется описание её окружения, включающее информацию о расстояниях и ориентации соседних точек, а также углах между ними (рисунок 9).

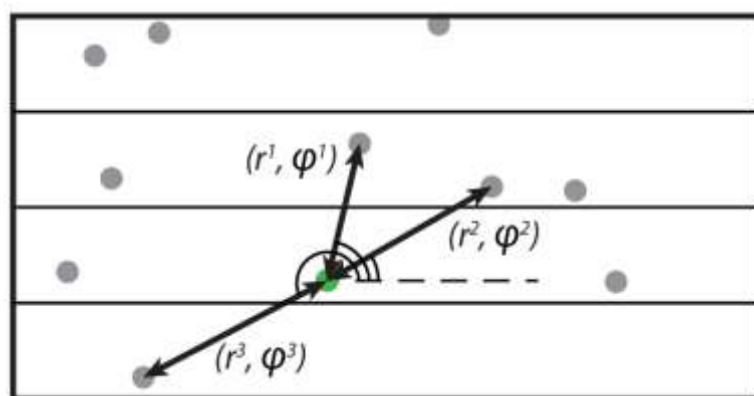


Рисунок 10 – Описание характерных точек (plets) и их окружения

3. Запись данных в виде матриц. Данные по описанию окружения характерных точек (plets) могут быть записаны в виде следующей матрицы:

$$P = \begin{bmatrix} r_1^1 & r_1^2 & \dots & r_1^k \\ r_2^1 & r_2^2 & \dots & r_2^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_m^1 & r_m^2 & \dots & r_n^k \end{bmatrix}$$

где P – матрица данных по окружению характерных точек;

r – величина расстояния до ближайшего элемента окружения;

φ – величина угла до ближайшего элемента окружения.

4. Сопоставление сохраненных в базе данных матриц производится методом поиска ближайших соседей в многомерном пространстве описаний характерных точек. Для каждой матрицы, полученной из изображения доски, осу-

ществляется поиск наиболее похожего соответствия среди матриц, хранящихся в базе данных бревен.

Следует отметить, что наработки в сопоставлении человеческой биометрии позволили достигнуть универсальности метода K-plets, позволяя идентифицировать соответствия, независимо от масштаба изображения или вращения. Это достигается за счёт того, что в методе используются относительные расстояния и углы между сучками.

Применение технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint)

Компания FinnosOy не раскрывает коммерческих подробностей применения данной технологии, однако, во всех известных презентациях от FinnosOY содержится информация о том, что предприятия, применяющие метод определения бревна с использованием «биометрического паспорта», достигают точности 99,7 % опознавания повторно сканируемых брёвен [12]. Более того, имея данные о конкретных брёвнах, вошедших в план распиловки, распределение информации о конкретном соответствии досок и брёвен возможно почти со 100 % точностью. Это означает, что практически каждое бревно на входе лесопильного цеха было корректно соотнесено с самим собой на выходе сортировочной линии. Такой результат сопоставим с надёжностью биометрических систем распознавания личности. С учётом практики применения данной технологии для обеспечения статистических данных для наиболее точного формирования себестоимости продукции и оптимизации производственных процессов, до настоящего времени подобный результат можно с уверенностью назвать непревзойдённым.

По заявлениям производителя, скорость формирования «биометрического отпечатка» бревна после его сканирования и создания трёхмерной модели, происходящих по умолчанию для любого сортировочного комплекса, составляет от 10 до 15 миллисекунд [12], а поиск соответствий по базе данных составляет менее 100 миллисекунд. Таким образом, процесс составления и сопоставления «отпечатка» для каждого бревна практически не отразится на скорости производственного процесса.

Преимущества систем сквозного контроля в лесопилении

Внедрение технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint) и систем сквозного контроля, использующих данную технологию, обеспечивает ряд преимуществ в лесопильном производстве, которые перечислены ниже.

1. Увеличение выхода объёма делового пиломатериала. Поскольку в данном случае индивидуальные характеристики каждого бревна известны до нача-

ла процесса пиления, появляется возможность оптимизировать схему распила бревна на требуемые сорта и размеры пиломатериалов. Например, если данные рентгеновского сканирования показывают, что какая-то часть бревна имеет большие сучки или другие дефекты, то схему распила бревна построить так, чтобы обойти эти дефекты или же вырезать их. В итоге обеспечивается увеличение выхода полезного пиломатериала из кубического метра сырья.

Кроме того, сопоставление индивидуальных характеристик бревна с выходящим пиломатериалом позволяет и обосновывает дальнейшее развитие производственной культуры с глубоким анализом производительности, например, какие бревна (по диаметру, плотности, происхождению) в каких пропорциях дают наибольший выход определенных сортов досок. Это служит хорошим средством обратной связи для поставщиков сырья и настройки оборудования (режимы пиления, углы поворота бревен, давления нажима на окоривателе). В результате сквозной контроль обеспечивает переход от средних норм к индивидуальным настройкам для каждого бревна, что снижает количество неделовых отходов при распиловке брёвен.

2. Устранение ошибок и одновременное повышение стабильности. Вероятность неправильной классификации типов бревен или некорректной работы оборудования снижается, когда каждое бревно отслеживается отдельно. Например, если бревна сортируются традиционным способом по их качеству, то бревно более качественного сорта может быть неправильно классифицировано и оказаться в партии низкосортного, в результате чего его распил будет выполнен неоптимальным образом. Однако, если каждому бревну при входе присваивается уникальный идентификатор (ID) и устанавливаются его качественные характеристики, то сканирование ID на линии становится простым средством информирования о том, соответствует ли поступившее на распиловку бревно, требуемой схеме распила. Если обнаруживается несоответствие, например, система не распознает бревно или видит новые дефекты, бревно можно отправить на дополнительную обработку. Более того, сквозной контроль упрощает расследование инцидентов: если на выходе находится дефектная доска, то легко восстановить данные по ID и определить, из какого бревна она получена, а затем выяснить, когда она была получена, чтобы установить причину (неправильная настройка конкретного оборудования, ошибка оператора и т.д.).

3. Доверие потребителей и сертификация. С учётом постоянно возрастающего внимания к законности источников лесосырья и экологической ответственности, возможность проследить, как каждая единица продукции проходи-

ла путь от леса до склада, является преимуществом. Прозрачность гарантирует непрерывный поток данных, который позже может быть интегрирован с системой сертификации древесины (например, с отечественной системой ФГИС ЛК). Таким образом, вместо случайных проверок партия распиленной древесины сопровождается своим цифровым паспортом, указывающим, из каких бревен она была произведена и с какого места заготовки она была получена. Потребитель или инспектор могут запросить проверку, и система предоставит ему точную информацию. Это значительно снижает возможное проникновение незаконно заготовленной древесины на рынок. Кроме того, некоторым клиентам (например, европейским строительным компаниям) нужна гарантированная прослеживаемость для подтверждения качества и соблюдения стандартов. Технология wood fingerprint упрощает предоставление таких гарантий без необходимости ручной маркировки каждой единицы пиломатериала или готового изделия из древесины.

4. Экологический мониторинг и экологический след. Сквозной контроль имеет экологическое воздействие. Экологический след представляется результатом отслеживания экологического влияния на каждом звене цепочки поставок готового изделия: сколько углерода сохранено в продукте, откуда пришел лес (каким образом он доставлялся) и насколько эффективно был использован ресурс. Имея подобную информацию о каждом бревне, можно рассчитать, сколько древесины попало в продукт, и сколько было потеряно (щепа, опилки), что характеризует экологичность и максимально эффективное использование ресурса. Также, если прослеживаемость начинается с вырубki леса, потребитель конечного продукта может фактически определить регион и даже точное местоположение леса, откуда древесина произошла. Когда такая информация станет доступна через QR-коды или онлайн-системы, экологическая ответственность бизнеса и социальное доверие возрастут.

5. Интеграция данных управления и инженерии производства. С точки зрения управления наличие прослеживаемости сырья и готовой продукции трансформирует завод в единую интегрированную информационную систему. Это позволяет осуществлять глобальную оптимизацию процессов. Например, при наличии предварительной информации о всей партии брёвен возможно гибко планировать производственную программу на день, неделю или даже месяц: какой пиломатериал может быть произведён, где есть избыток определённых сортов и так далее. Операционный и управленческий контроль загрузки линий лесопиления, сушильных камер и цехов сортировки может основываться

на фактическом входе сырья, а не на прогнозируемых потребностях. Интеграция искусственного интеллекта также становится проще. Теперь возможно обучать алгоритмы на полных наборах данных для обеспечения предсказуемости, какие изменения параметров пиления приведут к улучшениям для имеющегося запаса брёвен.

Перспективы и связь с Индустрией 4.0

Концепция «умного» лесопильного завода является частью более широкой парадигмы Индустрии 4.0, которая подразумевает цифровизацию и взаимосвязь всех элементов производства на высшем уровне. Основной особенностью Индустрии 4.0 является использование киберфизических систем, больших данных, машинного обучения и датчиков с исполнительными механизмами, связанных через Интернет вещей для самостоятельного управления процессами. В этой архитектуре прослеживаемость является основой для информационного потока: информация о каждом объекте (брус, доска) перемещается по предприятию и может анализироваться в реальном времени. Технология «отпечатка» древесины (wood fingerprint) идеально вписывается в эту парадигму и обеспечивает надёжную идентификацию объектов без какого-либо ручного вмешательства.

В будущем лесозаводы, оборудованные системами с технологией «отпечатка» древесины, смогут достичь следующих характеристик умного производства:

- 1) Цифровой двойник производства. Для каждого поступающего бревна создаётся цифровой двойник, который содержит всю соответствующую информацию о его характеристиках. Модель затем обновляется информацией в течение всего процесса (например, она дополняется данными о фактически полученных бревнах и их качестве). Глубокое обучение таких моделей позволяет проводить сложные симуляции. Например, компания FinnosOy совместно с партнёрами реализует проект, в рамках которого делается симуляция всего процесса – от закупки брёвен до доставки пиломатериалов потребителям. Симуляция строится на основе данных из нескольких финских лесопильных предприятий с использованием искусственного интеллекта. По мере сканирования новых брёвен модель учится более точно прогнозировать результаты пиления и регулировать управление в реальном времени. Модель нейросети, обученная на тысячах распиленных брёвен, может предоставлять рекомендации для оптимальных действий оператора или автоматически управлять производственными линиями для максимальной эффективности.

2) Гибкая перенастройка оборудования. Когда известны характеристики каждого бревна, оборудование (окориватель, транспортёр, пильный станок, сортировочный комплекс и комплекс для сушки пиломатериалов) может автоматически подстраиваться под него. Например, система, распознав бревно ID#45678 как крупномер с эксцентричной сердцевиной и одной кривизной, даст команду станку повернуть его определённым образом и выбрать схему раскроя, отличную от схемы раскроя для предыдущего бревна. В традиционной системе такой индивидуальный подход был бы невозможен из-за отсутствия точной информации или затруднений в перенастройке «на лету». Но «умный» завод, оснащённый сервоприводами и управляющим программным обеспечением, может реализовать динамическую перенастройку оборудования под каждый экземпляр сырья.

3) Прогнозирование и предотвращение поломок оборудования. Анализ «больших данных» о проходе тысяч брёвен через процессы производства поможет определить слабые места машин или технологий. Например, если статистически установлено, что брёвна с определёнными характеристиками часто вызывают поломки или задержки на определённых участках (например, превышающие норму кривизны, которые значительно затрудняют сортировку досок или с определёнными показателями плотности). В таких случаях система раннего предупреждения сигнализирует о возрастающем риске, и инженер может предпринять предварительные меры (от перенаправления этих бревен до обслуживания оборудования). Кроме того, полная история каждого элемента позволяет отслеживать дефекты: если партия пиломатериала имеет проблему, легко просканировать базу данных на предмет общих характеристик – возможно, все они происходят из брёвен определённого поставщика или были обработаны на конкретном станке, что указывает на возможные неполадки. Такие аналитические возможности возникают исключительно из наличия согласованных данных, предоставляемых системой «отпечатков» древесины.

4) Чёткая интеграция с цепочкой поставок. «Умный» завод не функционирует сам по себе, он интегрируется в большую цепочку поставок с лесными предприятиями, транспортными узлами, клиентами и обменивается с ними информацией. Если каждое бревно имеет идентификатор, известный поставщику, бревно автоматически входит в цифровую систему завода при доставке, что может сократить число повторяющихся процессов (необходимо только сканирование для подтверждения). Впоследствии готовый продукт, отправляемый клиенту, может передать свой электронный паспорт и мебельная фабрика, по-

лучающая доски, наряду с пиломатериалами получит информацию об их характеристиках и происхождении. В конечном итоге формируется единая информационная среда цепочки поставок изделий из древесины, где fingerprint-идентификатор может послужить в качестве ключа доступа к полному досье на древесину, что соответствует концепции сквозных цифровых цепочек поставок (Digital Supply Chain).

По мере развития технологии использование «отпечатков» древесины – это уже не узкоспециализированный инструмент идентификации для нужд конкретного завода. Под её применение могут подтянуться процессы всего оборота древесины. Продолжение работы по её внедрению, интеграция нейросетевых алгоритмов, удешевление оборудования или ускорение сканирования, повысит эффективность работы в этой отрасли и улучшит информационную прозрачность. Предполагается, что в течении пяти–десяти лет такое оборудование станет необходимым в составе лесопильных заводов, прежде всего, средних и крупных, которые стремятся интегрироваться в Индустрию 4.0.

Заключение

Лесопильное производство в первой половине XXI века имеет много возможностей, которые точно повлияют на её развитие, создавая новый уровень эффективности и предсказуемости процессов. Современные технологии идентификации брёвен имеют множество преимуществ для работы с открытым мировым рынком, что незаслуженно недооценивается. В отличие от организации труда на заводах, где индивидуальный подход к каждому бревну отсутствует, сегодня уже могут использоваться мощные алгоритмы типа сканирования и сопоставления. С каждым древесным стволом можно работать с учётом его уникальных свойств и физических параметров.

В настоящее время можно уверенно сказать, что сквозной контроль на основе технологии «отпечатка» древесины (wood fingerprint) станет обычной практикой на «умных» лесопильных заводах. При этом по мере развития технологий и усовершенствования нейросетевых алгоритмов, доступность этой технологии будет расти, а требования к оборудованию упрощаться.

Список литературы

1. Николаев, А.И. Особенности функционирования автоматизированной системы учёта заготовленной древесины и контроля её происхождения / А.И. Николаев, А.В. Стариков, К.В. Батулин // Лесотехнический журнал. –2016. – №3. –С. 109-117.–DOI: 12737/21687.

2. Uusijärvi, R. Integrating quality information with production data in sawmilling / R. Uusijärvi // Proc. of ScanTech. – 2003. – Vol. 03.
3. Chikkerur, S. K-plet and coupled BFS: A graph based fingerprint representation and matching algorithm / S. Chikkerur, A. Cartwright, V. Govindaraju // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). –2006. –P. 309-315.
4. Рентгеновские сканеры FINNOS– революция в лесопильной отрасли / Журнал «ЛПК Сибири». –URL: <https://lpk-sibiri.ru/equipment/sawmill-equipment/rentgenovskie-skanery-finnos>(дата обращения: 19.03.2025)
5. Кармакова, М. Эра рентгена: рентгеновские сканеры древесины / М. Кармакова // Лесной комплекс. – 2022. – №2 (54). – С. 46-51. –URL: https://forestcomplex.ru/wp-content/uploads/Issue/ForestComplex2022_2.pdf(дата обращения: 19.03.2025).
6. ГОСТ 32594-2013 Лесоматериалы круглые. Методы измерений.– М.: Стандартиформ, 2015. – 36 с.
7. Automatic Wood Species Classification and Pith Detection in Log CT Images/ O. Vacek, T. Gergel, T. Bucha[et al.] // Forests. –2024. – Vol. 15. – С. 2207. – DOI:10.3390/f15122207.
8. Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition / J. Wang, K. Sun, T. Cheng [et. al.] // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. –2021. – Vol. 43. – Pp. 3349-3364.
9. Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images / R. Schraml, J. Charwat-Pessler, A. Petutschnigg, A. Uhl // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. –Vol. 119. – Pp. 112-122.
10. Pahlberg, T. Wood Fingerprints: Recognition of Sawn Wood Products / T. Pahlberg // Thesis. – Luleå University of Technology, 2014. – 89 p. – DOI:10.13140/2.1.2479.4407.
11. Алгоритм сравнения отпечатков пальцев: комбинация классических алгоритмов. – URL: <https://habr.com/ru/companies/samsung/articles/642579/> (дата обращения: 19.03.2025).
12. Heikkinen, J. Finnos Presentation X-Ray & AI-reinforced sawmill – Sawmill of 2020's / J. Heikkinen // 25/11/2020 – CIFQ – Conseil de l'industrie forestière du Québec. –URL: <https://cifq.com/documents /file/lecture-de-billes-pour-optimisation-mesurage-et-classification-par-ct-scan-x-ray-f-giguere-prologic-j-heikkinen-finnos.pdf> (дата обращения: 19.03.2025)

References

1. Nikolaev, A.I. Features of the functioning of an automated accounting system for harvested wood and control of its origin / A.I. Nikolaev, A.V. Starikov, K.V. Baturin // Forestry journal. – 2016. – №3. – Pp. 109-117. – DOI: 12737/21687.
2. Uusijärvi, R. Integrating quality information with production data in sawmilling / R. Uusijärvi // Proc. of ScanTech. – 2003. – Vol. 03.
3. Chikkerur, S. K-plet and coupled BFS: A graph based fingerprint representation and matching algorithm / S. Chikkerur, A. Cartwright, V. Govindaraju // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2006. – P. 309-315.
4. FINNOS X-ray scanners - a revolution in the sawmill industry / LPK Siberia magazine. - URL: <https://lpk-sibiri.ru/equipment/sawmill-equipment/rentgenovskie-skanery-finnos> (accessed: 19.03.2025).
5. Karmakova, M. The era of X-ray: X-ray scanners of wood / M. Karmakova // Forest complex. – 2022. – №2 (54). – Pp. 46-51. – URL: https://forestcomplex.ru/wp-content/uploads/Issue/ForestComplex2022_2.pdf (accessed: 03/19/2025).
6. GOST 32594-2013 Round timber. Measurement methods. –Moscow : Standartinform, 2015.– 36 p .
7. Automatic Wood Species Classification and Pith Detection in Log CT Images / O. Vacek, T. Gergel, T. Bucha [et al.] // Forests. – 2024. – Vol. 15. – C. 2207. – DOI: 10.3390/f15122207.
8. Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition / J. Wang, K. Sun, T. Cheng [et. al.] // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – 2021. – Vol. 43. – Pp. 3349-3364.
9. Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images / R. Schraml, J. Charwat-Pessler, A. Petutschnigg, A. Uhl // Computers and Electronics in Agriculture. - 2015. - Vol. 119. - Pp. 112-122.
10. Pahlberg, T. Wood Fingerprints: Recognition of Sawn Wood Products / T. Pahlberg // Thesis. - Luleå University of Technology, 2014. - 89 p. - DOI:10.13140/2.1.2479.4407.
11. Fingerprint comparison algorithm: a combination of classical algorithms. - URL: <https://habr.com/ru/companies/samsung/articles/642579/> (accessed: 19.03.2025).

12. Heikkinen, J. Finnos Presentation X-Ray & AI-reinforced sawmill – Sawmill of 2020s / J. Heikkinen // 25/11/2020 - CIFQ - Conseil de l'industrie forestière du Québec. - URL: [https://cifq.com/documents /file/lecture-de-billes-pour-optimisation-mesurage-et-classification-par-ct-scan-x-ray-f-giguere-prologic-j-heikkinen-finnos.pdf](https://cifq.com/documents/file/lecture-de-billes-pour-optimisation-mesurage-et-classification-par-ct-scan-x-ray-f-giguere-prologic-j-heikkinen-finnos.pdf) (accessed: 19.03.2025).