

Вестник Череповецкого государственного университета, 2026, № 3 (132), с. 7–17.  
Cherepovets State University Bulletin, 2026, no. 3 (132), pp. 7–17.

Научная статья  
УДК 303.732.4  
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-3-132-1>  
<https://elibrary.ru/xbpagl>

## Сравнительный анализ методов извлечения уникальных признаков изображений торцов сортиментов для формирования цифровых паспортов древесины

Александр Сергеевич Гайдаренко<sup>1✉</sup>, Ирина Сергеевна Васендина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,  
Архангельск, Россия

<sup>1</sup>✉ [gajdarenkosasha@gmail.com](mailto:gajdarenkosasha@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-3121-6256>

<sup>2</sup>[i.vasendina@narfu.ru](mailto:i.vasendina@narfu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4504-0981>

**Аннотация.** В условиях цифровизации лесной отрасли и усиления контроля за оборотом древесины важной задачей является надежная идентификация сортиментов. Один из эффективных подходов заключается в использовании визуальных характеристик торцов сортимента, имеющих уникальную природную структуру, для создания цифрового идентификатора. Данная работа направлена на исследование методов извлечения уникальных признаков из изображений торцов сортиментов и их использование для формирования криптографически защищенных цифровых паспортов. Рассматриваются как классические, так и нейросетевые методы выделения признаков, проводится их сравнительный анализ по количественным и качественным метрикам. Признаки преобразуются в хеш-значения по алгоритму SHA-256 и фиксируются в блокчейне. Экспериментальные результаты показывают значительные различия между методами по плотности признаков, устойчивости при сопоставлении и вычислительной эффективности, что позволяет выбрать оптимальные алгоритмы для практического применения в системах учета древесины.

**Ключевые слова:** сортимент, уникальные признаки изображения, компьютерное зрение, сопоставление признаков

**Для цитирования:** Гайдаренко А. С., Васендина И. С. Сравнительный анализ методов извлечения уникальных признаков изображений торцов сортиментов для формирования цифровых паспортов древесины. *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2026, № 3 (132), с. 7–17. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-3-132-1>; EDN: XBPAGL

**Comparative analysis of methods for extracting unique features from timber  
end-grain images for the digital timber passports**Aleksandr S. Gaidarenko<sup>1✉</sup>, Irina S. Vasendina<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov,  
Arkhangelsk, Russia<sup>1✉</sup>gajdarenkosasha@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3121-6256><sup>2</sup>i.vasendina@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4504-0981>

**Abstract.** In the context of the digitalization of the forestry industry and enhanced control over timber circulation, the reliable identification of timber assortments becomes an important task. One effective approach is to use the visual characteristics of the end-grain of timber, which have a unique natural structure to generate a digital identifier. This work aims to investigate methods for extracting unique features from timber end-grain images and their use for making up cryptographically secure digital passports. Both classical and neural network-based feature extraction methods are considered, and their comparative analysis is conducted based on quantitative and qualitative metrics. The features are converted into hash values using the SHA-256 algorithm and recorded in a blockchain. Experimental results show significant differences between the methods in terms of feature density, matching stability, and computational efficiency, enabling the selection of optimal algorithms for practical implementation in timber accounting systems.

**Keywords:** timber assortment, unique image features, computer vision, feature matching

**For citation:** Gaidarenko A. S., Vasendina I. S. Comparative analysis of methods for extracting unique features from timber end-grain images for the digital timber passports. *Cherepovets State University Bulletin*, 2026, no. 3 (132), pp. 7–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-3-132-1>; EDN: XBPAGL

**Введение**

Лесная промышленность относится к числу базовых отраслей экономики, при этом задачи контроля происхождения и перемещения древесины до настоящего времени остаются во многом нерешенными. Применяемые на практике методы учета сортиментов преимущественно основаны на сопроводительной документации, партийной маркировке и использовании косвенных признаков, что не исключает возможности подмены, дублирования или искажения информации<sup>1</sup>.

В связи с этим особое значение приобретает задача индивидуальной идентификации каждого сортимента на всех этапах его жизненного цикла – от заготовки до переработки и экспорта. В отличие от традиционного партийного учета, индивидуальный подход позволяет повысить прозрачность происхождения древесины и обеспечить более высокую достоверность данных, используемых при контроле логистических операций.

Перспективным направлением решения этой задачи является использование визуальных характеристик торца сортимента, который представляет собой срез годичных колец и волокон, формирующих сложную, нерегулярную и практически непо-

<sup>1</sup> Сушко О. П. Направления и перспективы цифровизации лесного комплекса. *Экономика, предпринимательство и право*, 2023, т. 13, № 11, с. 5127–5142. <https://doi.org/10.18334/epp.13.11.118935>

вторимую структуру, которая определяется природными условиями роста дерева и не поддается целенаправленному искусственному воспроизведению, что позволяет рассматривать ее в качестве естественного идентификатора объекта<sup>1</sup>.

В то же время прямое сравнение изображений торцов сортиментов затруднено вследствие вариаций условий съемки, включая изменения освещенности, масштаба и угла обзора, а также наличие шумов. В этих условиях ключевой научной задачей становится извлечение устойчивых и воспроизводимых визуальных признаков, сохраняющих индивидуальность торца при допустимых искажениях входных данных.

С точки зрения системного анализа данная задача сводится к выбору методов обработки изображений, обеспечивающих формирование информативных признаковых представлений при ограничениях по вычислительным ресурсам и времени обработки<sup>2</sup>. Извлеченные признаки могут быть выражены в виде числовых дескрипторов, на основе которых формируется компактное представление изображения, пригодное для автоматизированного сопоставления.

Для обеспечения неизменяемости и защиты от подделки такие представления могут быть преобразованы в криптографические хеш-значения, например, с использованием алгоритма SHA-256, и зафиксированы в распределенном реестре. Данный подход позволяет формировать цифровой паспорт сортимента, содержащий неизменяемую ссылку на его визуальную идентичность.

Несмотря на широкий спектр методов компьютерного зрения, применимость конкретных алгоритмов к изображениям торцов сортиментов остается недостаточно изученной. Текстура древесины характеризуется низкой контрастностью, выраженной радиальной структурой и отсутствием регулярных геометрических элементов, что существенно отличает ее от типовых изображений, для которых разрабатывались многие классические и нейросетевые методы. В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительного анализа различных подходов к извлечению и сопоставлению визуальных признаков применительно к изображениям торцов сортиментов. Такой анализ позволяет обосновать выбор алгоритмов, наиболее подходящих для задач цифровой идентификации и формирования цифровых паспортов древесины.

### Основная часть

Целью настоящей работы является исследование и сравнительный анализ методов извлечения уникальных признаков из изображений торцов сортиментов, ориентированных на последующее формирование цифрового паспорта древесины. В рамках него рассматривается возможность использования визуальных характеристик

<sup>1</sup> Носков В. А. Подходы к цифровой трансформации лесного хозяйства России с учетом зарубежного опыта. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*, 2024, <https://doi.org/10.15593/22249354/2024.4.15>; EDN: XZNSLA

<sup>2</sup> Краснобаев Е. А., Чистобаев Д. В., Малышев А. Л. Сравнение бинарных дескрипторов особых точек изображений в условиях искажений. *Компьютерная оптика*, 2019, т. 43, № 3, с. 434–445. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>; EDN: FBYOVH

торца в качестве устойчивого источника индивидуальной идентификации объекта при различных условиях съемки и последующей обработки изображений.

Для достижения поставленной цели в работе решается совокупность взаимосвязанных задач, включающих выделение воспроизводимых визуальных признаков торцов сортиментов, анализ плотности и стабильности формируемых признаков представлений, а также оценку качества сопоставления изображений, принадлежащих одному и тому же объекту. Отдельное внимание уделяется исследованию вычислительной эффективности рассматриваемых методов, поскольку данный параметр является критически важным при разработке систем массовой идентификации и их практического внедрения в производственные условия.

На основе полученных экспериментальных результатов выполняется обоснование выбора алгоритмов, наиболее пригодных для реализации прикладных решений в области цифрового учета древесины. Таким образом, постановка задачи ориентирована не только на сравнительный анализ методов компьютерного зрения, но и на оценку их применимости в составе информационных систем формирования цифровых паспортов сортиментов, к которым предъявляются требования по устойчивости, воспроизводимости и вычислительной надежности применяющихся алгоритмов.

Рассматриваемая система цифровой идентификации сортиментов основана на использовании визуальных характеристик торца древесины в качестве первичного источника уникальности и включает последовательность этапов, обеспечивающих формирование и последующую верификацию цифрового паспорта объекта. На начальном этапе выполняется съемка торца сортимента в контролируемых условиях, что позволяет снизить влияние внешних факторов, таких как неравномерное освещение, геометрические искажения и шумы, способные негативно сказаться на устойчивости извлекаемых признаков.

Полученное изображение подвергается обработке методами компьютерного зрения, в результате чего из него извлекаются признаки, отражающие индивидуальные особенности структуры годичных колец и волокон древесины. Сформированные признаки преобразуются в компактное числовое представление, пригодное для автоматизированной обработки и последующего сопоставления. Для обеспечения целостности и неизменяемости данных полученное представление используется в качестве входных данных для вычисления криптографического хеш-значения по алгоритму SHA-256<sup>1</sup>.

Вычисленное хеш-значение совместно с сопутствующими метаданными фиксируется в распределенном реестре, что обеспечивает защиту информации от подмены и несанкционированного изменения. На основе зафиксированных данных формируется цифровой паспорт сортимента, который в дальнейшем используется при процедурах верификации и подтверждения идентичности объекта на различных этапах его жизненного цикла. Таким образом, визуальные особенности торца древесины вы-

<sup>1</sup> Фёдоров В. Ю., Халяпин Д. Р. Blockchain для леса: обеспечение прослеживаемости древесины от делянки до потребителя. *Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития: материалы Международного лесного форума*. Воронеж, 2025, с. 690–699. [https://doi.org/10.58168/Forestry2025\\_690-699](https://doi.org/10.58168/Forestry2025_690-699)

ступают источником индивидуальности, а применение технологии распределенного реестра обеспечивает доверие, неизменяемость и прослеживаемость цифровых данных.

В работе рассматриваются как классические, так и нейросетевые подходы к извлечению уникальных признаков изображений:

- методы с явным детектором и дескриптором (SIFT, ORB, AKAZE);
- нейросетевые методы детектирования и описания ключевых точек (SuperPoint);
- плотные методы сопоставления без явного этапа детектирования (LoFTR).

Сравнение проводится по единым количественным и качественным метрикам, что позволяет объективно оценить пригодность каждого метода для решения задачи формирования устойчивых и воспроизводимых визуальных идентификаторов.

Качественные различия в характере и плотности извлекаемых признаков для рассматриваемых методов наглядно иллюстрируются на рис. 1, где представлен пример распределения ключевых точек на одном и том же изображении торца сортимента при использовании различных алгоритмов.

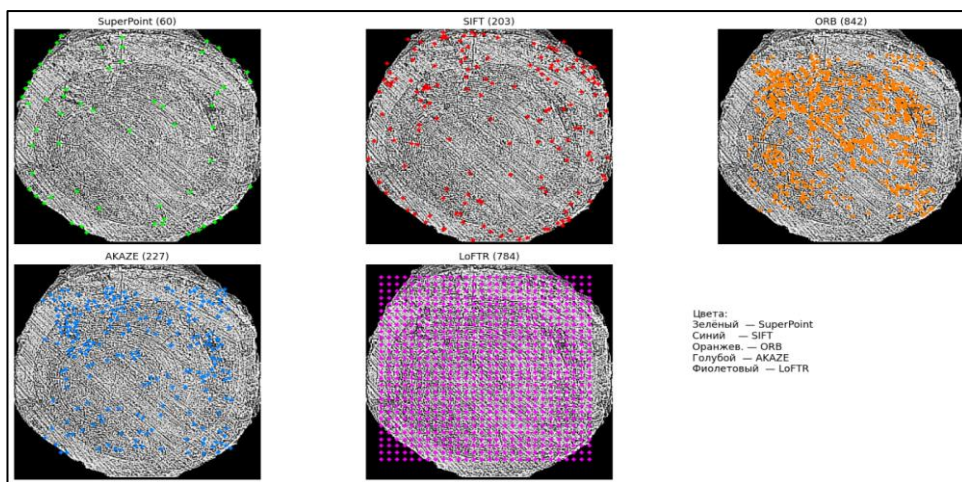


Рис. 1. Пример распределения извлеченных ключевых точек на изображении торца сортимента для различных методов

Как видно из рис. 1, классические методы формируют плотное покрытие текстурных элементов торца, тогда как нейросетевые подходы ориентированы на отбор ограниченного числа наиболее информативных структур. Метод LoFTR демонстрирует плотное покрытие без явного выделения ключевых точек, что отражает его принципиально иной механизм сопоставления.

В рамках проведенного эксперимента был выполнен сравнительный анализ методов извлечения уникальных признаков изображений на примере торцов сортиментов, представленных на однородном черном фоне. Оценка эффективности рассмат-

риваемых подходов осуществлялась на основе совокупности показателей, отражающих способность методов формировать информативные и вариативные признаки, чувствительные к индивидуальной структуре древесины и в то же время устойчивые к допустимым изменениям условий съемки. Дополнительно анализировалась вычислительная эффективность алгоритмов, включая скорость обработки и требования к вычислительным ресурсам, которые имеют принципиальное значение для практической реализации системы цифрового учета древесины. Существенное внимание уделялось устойчивости и геометрической согласованности признаков при попарном сопоставлении изображений одного и того же сортимента, что позволяло оценить надежность методов с точки зрения воспроизводимости результатов и корректности идентификации объекта.

Выбор используемых метрик оценки обусловлен их соответствием общепринятой практике анализа визуальных признаков и сопоставления изображений. Оценка устойчивости и воспроизводимости признаков осуществлялась на основе показателей количества соответствий, доли геометрически корректных соответствий (*inlier ratio*), а также ошибок репроекции, применяемых в задачах анализа визуального контента и многовидовой геометрии. Используемый набор метрик согласуется с международными рекомендациями по описанию и сравнению визуальных признаков, в том числе представленными в стандарте ISO / IEC 15938-3<sup>1</sup>, регламентирующем методы анализа визуальных характеристик изображений.

На первом этапе проводилось исследование распределения количества ключевых точек, извлекаемых каждым методом на одном изображении. Сводные статистические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Сводные характеристики количества извлекаемых ключевых точек**

Метод	Среднее число ключевых точек, шт.	Среднеквадратичное отклонение, шт.	Число изображений
SIFT	1349,96	270,48	500
ORB	899,19	9,05	500
AKAZE	719,57	77,11	500
SuperPoint	42,89	18,64	500
LoFTR	779,97	28,48	500

Как видно из табл. 1, классические методы (SIFT, ORB, AKAZE) характеризуются существенно большим средним числом извлекаемых ключевых точек по сравнению с нейросетевым методом SuperPoint. Метод LoFTR демонстрирует промежу-

<sup>1</sup> ISO / IEC 15938-3:2015. Информационные технологии. Интерфейс описания мультимедийного контента. Часть 3. Визуальные характеристики. Женева: ISO, 2015.

точные значения, обеспечивая высокую плотность сопоставляемых элементов при относительно низкой вариативности.

Анализ отдельных методов показывает следующие закономерности. Метод SIFT характеризуется наибольшим средним числом ключевых точек (1349,96 на изображение) при высокой дисперсии ( $\sigma \approx 270$ ), что указывает на его чувствительность к локальным текстурным вариациям годичных колец. Метод ORB демонстрирует высокую стабильность количества признаков (899,19 при  $\sigma \approx 9$ ), что свидетельствует о хорошей повторяемости, однако может ограничивать дискриминативность формируемых описаний. Метод AKAZE занимает промежуточное положение, сочетая умеренное число ключевых точек (719,57) с приемлемой устойчивостью ( $\sigma \approx 77$ ).

Нейросетевые методы демонстрируют принципиально иной подход к формированию признаков. Так, SuperPoint извлекает существенно меньшее количество ключевых точек (в среднем – 42,9), что отражает его ориентацию на отбор наиболее информативных и устойчивых структур. Метод LoFTR, не использующий классическое понятие ключевых точек, формирует плотные соответствия между изображениями, что выражается в условно фиксированном числе сопоставляемых элементов ( $\approx 780$ ).

Таким образом, количество извлекаемых признаков существенно различается между методами, что напрямую влияет на вычислительные затраты и устойчивость последующих процедур сопоставления.

Результаты анализа времени обработки одного изображения приведены на рис. 2, а усредненные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения времени обработки и количества ключевых точек

Метод	Среднее число ключевых точек, шт.	Среднее время обработки, с.	Среднеквадратичное отклонение, шт.
SIFT	1349,96	0,0838	270,75
ORB	899,19	0,0088	9,06
AKAZE	719,57	0,0274	77,19
SuperPoint	42,89	0,2494	18,66
LoFTR	779,97	—	28,51

Анализ показывает, что классические методы обладают существенным преимуществом по скорости обработки. Минимальное время демонстрирует метод ORB ( $\approx 0,009$  с.), за ним следуют AKAZE ( $\approx 0,027$  с.) и SIFT ( $\approx 0,084$  с.). Нейросетевые методы существенно уступают по данному показателю: SuperPoint требует в среднем около 0,25 с. на изображение, а метод LoFTR характеризуется наибольшими вычислительными затратами, что обусловлено глобальным характером сопоставления и сложной архитектурой модели.

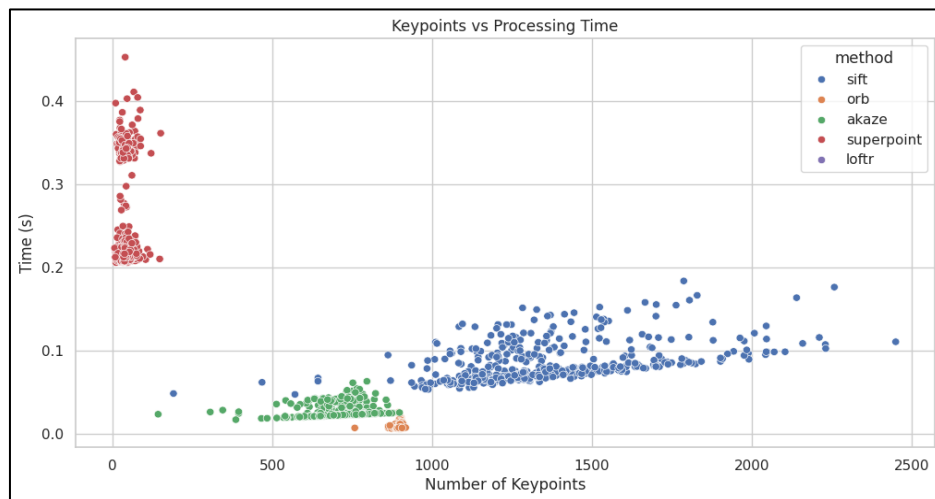


Рис. 2. Распределение времени обработки одного изображения различными методами

На рис. 2 показано распределение времени обработки одного изображения для рассматриваемых методов. Видно, что классические алгоритмы обладают не только меньшим средним временем выполнения, но и высокой стабильностью. Нейросетевые методы характеризуются существенно большим временем обработки и большей дисперсией, что необходимо учитывать при проектировании систем массовой идентификации.

Выявленная корреляция между количеством извлекаемых ключевых точек и временем обработки подтверждает, что увеличение числа признаков приводит к росту вычислительной сложности. Для нейросетевых методов данный эффект усиливается за счет необходимости выполнения операций сверточной обработки и глобального сопоставления.

Ключевой характеристикой пригодности метода для формирования уникального визуального идентификатора является устойчивость признаков при попарном сопоставлении изображений одного и того же объекта. Результаты анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

### Метрики попарного сопоставления изображений

Метод	Число соответствий	Число инлаэров	Доля инлаэров	Средняя ошибка репроекции	RMS-ошибка
SIFT	53	33	0,62	0,82	59,03
ORB	892	73	0,08	0,02	77,34
AKAZE	19	16	0,84	0,01	7,63
SuperPoint	16	11	0,69	0,01	9,93
LoFTR	684	344	0,50	0,06	7,50

Результаты анализа демонстрируют следующие закономерности. Метод AKAZE показывает наибольшую долю геометрически корректных соответствий (inlier ratio  $\approx 0,84$ ), что указывает на высокую согласованность извлекаемых признаков. Метод SIFT также демонстрирует высокую устойчивость ( $\approx 0,62$ ), однако при меньшем общем числе совпадений. SuperPoint обеспечивает сопоставимый уровень устойчивости ( $\approx 0,69$ ) при крайне малом числе ключевых точек, что подтверждает высокую информативность отобранных признаков.

На рис. 3 наглядно показано число геометрически корректных соответствий, полученных при попарном сопоставлении изображений. Метод LoFTR демонстрирует наибольшее абсолютное число инлаеров, что подтверждает его высокую способность к устойчивому сопоставлению сложных текстур торцов древесины.

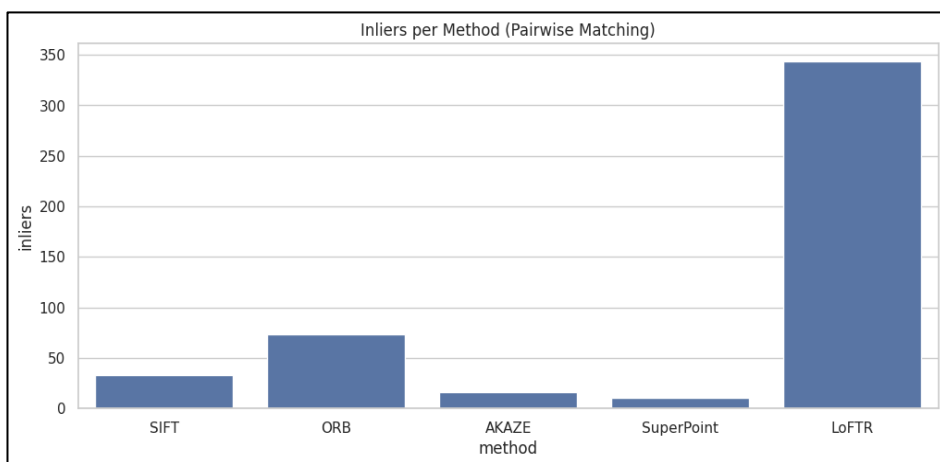


Рис. 3. Число геометрически корректных соответствий (inliers) при попарном сопоставлении

Метод LoFTR формирует наибольшее абсолютное число корректных соответствий (344 инлаера), однако относительная доля инлаеров ниже ( $\approx 0,50$ ), что объясняется плотной стратегией сопоставления. Метод ORB демонстрирует наименьшую устойчивость ( $\approx 0,08$ ), что делает его менее пригодным для задач, требующих высокой дискриминативности.

Ошибки репроекции и метрики геометрической точности подтверждают, что нейросетевые методы и AKAZE обеспечивают более компактное распределение ошибок, тогда как ORB характеризуется значительными отклонениями.

С точки зрения практической задачи – формирования цифрового паспорта сортимента – ключевым фактором является не абсолютное количество признаков, а их устойчивость, воспроизводимость и уникальность. Экспериментальные результаты показывают, что методы, ориентированные на отбор информативных структур и устойчивое сопоставление (AKAZE, SuperPoint, LoFTR), обеспечивают наиболее надежную основу для генерации уникальных признаков.

Формирование SHA-256 хешей на основе устойчивых визуальных признаков позволяет обеспечить неизменяемость цифрового паспорта при его записи в распределенный реестр, что является критически важным для задач учета, верификации и контроля оборота древесины.

### Выводы

В ходе работы была исследована задача извлечения уникальных признаков изображений торцов сортиментов в контексте формирования цифровых паспортов древесины. Проведенный сравнительный анализ показал, что не все методы компьютерного зрения одинаково эффективны для данной предметной области.

Наилучшие результаты по устойчивости сопоставления и количеству достоверных соответствий продемонстрировал метод LoFTR, что делает его наиболее перспективным для задач идентификации сортиментов. Классический метод SIFT показал высокую стабильность и может использоваться в качестве базового алгоритма. Методы ORB и SuperPoint продемонстрировали ограничения, связанные с качеством сопоставления и малой плотностью признаков соответственно.

Полученные результаты подтверждают возможность использования визуальных характеристик торцов сортиментов в качестве основы для построения криптографически защищенных цифровых паспортов бревен и могут быть задействованы при разработке систем цифрового учета древесины и контроля ее оборота.

### Список литературы / References

Краснобаев Е. А., Чистобаев Д. В., Малышев А. Л. Сравнение бинарных дескрипторов особых точек изображений в условиях искажений. *Компьютерная оптика*, 2019, т. 43, № 3, с. 434–445. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>; EDN: FBYOBN

Krasnobaev E. A., Chistobaev D. V., Malyshev A. L. Comparison of binary feature points descriptors of images under distortion conditions. *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 434–445. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>; EDN: FBYOBN

Носков В. А. Подходы к цифровой трансформации лесного хозяйства России с учетом зарубежного опыта. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*, 2024, № 4, с. 237–260. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2024.4.15>; EDN: XZNSLA

Noskov V. A. Approaches to the digital transformation of Russian forestry taking into account foreign experience. *PNRPU Sociology and Economics Bulletin*, 2024, no. 4, pp. 237–260. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2024.4.15>; EDN: XZNSLA

Сушко О. П. Направления и перспективы цифровизации лесного комплекса. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023, т. 13, № 11, с. 5127–5142. <https://doi.org/10.18334/epp.13.11.118935>

Sushko O. P. Directions and prospects of the forest complex digitalization. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 5127–5142. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/epp.13.11.118935>

Фёдоров В. Ю., Халяпин Д. Р. Blockchain для леса: обеспечение прослеживаемости древесины от делянки до потребителя. *Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития: материалы Международного лесного форума*. Воронеж, 2025, с. 690–699. [https://doi.org/10.58168/Forestry2025\\_690-699](https://doi.org/10.58168/Forestry2025_690-699)

Fedorov V. Yu., Khaliapin D. R. Blockchain for forestry: Ensuring timber traceability from logging site to consumer. *Forestry under Global Challenges: New Paradigms of Sustainable Development. Proceedings of the International Forestry Forum*. Voronezh, 2025, pp. 690–699. (In Russ.) [https://doi.org/10.58168/Forestry2025\\_690-699](https://doi.org/10.58168/Forestry2025_690-699)

ISO / IEC 15938-3:2015. *Информационные технологии. Интерфейс описания мультимедийного контента*. Часть 3. Визуальные характеристики. Женева: ISO, 2015.

ISO / IEC 15938-3:2015. *Information technology. Multimedia content description interface*. Part 3: Visual characteristics. Geneva: ISO, 2015. (In Russ.)

### Сведения об авторах

**Александр Сергеевич Гайдаренко** – аспирант; <https://orcid.org/0009-0001-3121-6256>, [gajdarenkosasha@gmail.com](mailto:gajdarenkosasha@gmail.com), Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (д. 17, ул. наб. Северной Двины, 163002 Архангельск, Россия); **Aleksandr S. Gaidarenko** – Postgraduate Student, <https://orcid.org/0009-0001-3121-6256>, [gajdarenkosasha@gmail.com](mailto:gajdarenkosasha@gmail.com), Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, nab. Severnoi Dviny, 163002 Arkhangelsk, Russia).

**Ирина Сергеевна Васендина** – кандидат технических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0003-4504-0981>, [i.vasendina@narfu.ru](mailto:i.vasendina@narfu.ru), Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (д. 17, ул. наб. Северной Двины, 163002 Архангельск, Россия); **Irina S. Vasendina** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4504-0981>, [i.vasendina@narfu.ru](mailto:i.vasendina@narfu.ru), Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, nab. Severnoi Dviny, 163002 Arkhangelsk, Russia).

**Заявленный вклад авторов:** авторы сделали разный вклад в подготовку публикации, что отражено в последовательности персоналий авторского коллектива. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors made different contributions to the preparation of the publication, which is reflected in the sequence of personalities of the author's team. The authors declare no conflicts of interests.

---

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 06.04.2026.

The article was submitted 05.02.2026; Approved after reviewing 16.03.2026; Accepted for publication 06.04.2026.