

М.В. Уткин, М.О. Филатова ✉

Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия
E-mail: Mayasidorova12@gmail.com

Проблема автоматизации дендрохронологических измерений: современные подходы к решению

В данной работе рассматривается проблема автоматизации дендрохронологических измерений. Древесно-кольцевой анализ требует предварительного определения границ годичных колец, что традиционно выполняется вручную с использованием стереоскопа, подвижного стола и регистратора данных. Однако этот процесс отнимает много времени и очень обременителен, особенно в случае наличия длинных древесно-кольцевых рядов. Разработка полностью автоматического, универсального метода определения границ годичных колец представляет собой сложную задачу, связанную с разнообразием типов анатомических структур разных видов деревьев. Существует несколько подходов к автоматическому обнаружению границ колец; однако они используют базовые методы обработки изображений (основанные на первой производной изображения): фильтр Собеля, детектор границ Кэнни и др. В результате их точность ограничена, а их применение возможно только для древесины хвойных пород, где границы годичных колец четко определены. Также существует коммерческое программное обеспечение, однако ни одно не является универсальным, поскольку они не работают применительно к кольцесосудистым породам древесины. Недавние разработки в области машинного обучения все больше доказывают, что ручной выбор признаков может быть успешно заменен автоматическим. В частности, в нескольких зарубежных работах стали успешно применять сверточные нейронные сети (CNN) в идентификации, распознавании и обучении признаков, в чем они продемонстрировали довольно высокую производительность. Более того, поскольку CNN способны идентифицировать функции, недоступные человеческому восприятию, в некоторых приложениях изученные функции позволяют превзойти человеческую точность. Кроме того, их применение не требует априорных знаний о внешнем виде границ годичных колец, что делает метод универсальным для любой породы древесины. Единственным их недостатком является тот факт, что обучение нейронных сетей занимает довольно много времени. Однако следует помнить, что данный процесс необходимо проводить только один раз.

Ключевые слова: дендрохронология, измерение ширины годичных колец, автоматизация измерений, сверточные нейронные сети.

М. V. Utkin, M. O. Phylatova ✉

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia
E-mail: Mayasidorova12@gmail.com

Problem of Dendrochronological Measurement Automation: Modern Approaches to Solution

This article discusses the problem of automating dendrochronological measurements. Tree-ring analysis requires the preliminary determination of tree-ring boundaries, which is traditionally performed manually using a stereoscope, moving table, and data logger. However, this process is time-consuming, especially in the case of long tree-ring series. Developing a fully automatic, universal method for determining the boundaries of tree rings is a complex task due to variety of different tree species and types of their anatomical structures. There are several approaches to automatically detect ring boundaries; however, they use basic image processing methods (based on the first derivative of the image): Sobel filter, Canny edge detector, etc. As a result, their accuracy is limited, and their application is only possible for softwood where the boundaries of growth rings are clearly defined. There is also commercial software available, but none of them are universal because they do not work on ring-porous wood cores. Recent developments in machine learning increasingly prove that manual feature selection can be successfully replaced by automatic feature selection. Several foreign works have begun to successfully use convolutional neural networks (CNN) in identifying, recognizing, and learning features, in which they have demonstrated fairly high performance. Moreover, since CNNs are able to identify the features which are beyond human perception, the learned features can surpass human accuracy in some applications. Moreover, their use does not require a priori knowledge about appearance of boundaries in tree rings, which makes the method universal for any type of wood. Their only shortage is the fact that training neural networks takes a lot of time. However, it must be remembered that this process needs to be done only once.

Keywords: dendrochronology, annual ring width measurement, measurement automation, convolutional neural networks.

Введение

Дендрохронология – научная дисциплина, занимающаяся датировкой годовых колец древесины и связанных с ними событий [Шиятов и др., 2000, с. 6]. Традиционно измерение ширины годовых колец в дендрохронологии производится на полуавтоматической установке Lintab (стереоскопа с подвижной платформой и регистратором данных) специально обученным человеком. Подобный метод измерений является самым популярным, благодаря своей точности и надежности; но в то же самое время он является и довольно обременительным, поскольку требует больших временных затрат (т.к. годовые кольца приходится измерять вручную одно за другим). Это ограничивает его применимость, особенно в случае исследования длинных рядов годовых колец.

В последние годы измерение годовых колец все чаще производится на цифровых изображениях образцов древесины при помощи специальных программ (напр., WinDENDRO™, CDendro & Coorecorder, LignoVision™). Подобный подход становится все более популярным, поскольку даже частичная автоматизация может значительно ускорить процесс анализа по сравнению с классическими измерениями (с использованием традиционного оборудования).

Несмотря на это, область применения метода измерений годовых колец на основе изображений по-прежнему довольно ограничена по причине их зависимости от ряда дополнительных факторов: подготовки образцов, разрешения (качества) изображения, а также от типа исследуемой древесины. Из-за этого существующее программное обеспечение часто не может определить границы годовых колец, даже если они легко различимы для эксперта.

Разработка полностью автоматизированного универсального способа обнаружения годовых колец на основе изображений является чрезвычайно сложной задачей. Помимо того, что существуют три основных типа пород древесины, кардинально отличающихся по анатомическому строению друг от друга (хвойные, кольцесосудистые и рассеянососудистые деревья), зачастую строение древесины значительно различается и между породами одной группы. Более того, довольно часто можно наблюдать существенные различия между годовыми кольцами одного и того же вида деревьев (в зависимости от условий окружающей среды, в которых деревья проживали) и даже между кольцами внутри одного конкретного дерева. Все эти различия выражаются в огромном разнообразии характеристик изображений древесной поверхности [Pan, Kudo, 2011, р. 250–260], что, в свою очередь, приводит к необходимости использования различных подходов к обнаружению годовых колец для разных пород и видов.

Преобладающее количество исследований, связанных с выявлением годовых колец в образцах древесины, относится к породам хвойного типа древесины

с относительно простым анатомическим строением годовых колец, которое на отсканированном изображении выглядит как совокупность более светлых (ранняя древесина) и более темных (поздняя древесина) участков площади поверхности [Borianne, Pernaudat, Subsol, 2011; Cerda, Hitschfeld-Kahler, Mery, 2007; Conner et al., 1998; Soille, Misson, 2001; Fabijanska, Danek, 2018; Rigozo et al., 2004; Sheppard, Graumlich, 1994; Sioma, Socha, 2016; Zhou et al., 2012].

Гораздо меньше исследований посвящено другим типам древесины с более сложной структурой древесины: рассеянососудистой [Entacher, Planitzer, Uhl, 2007; Latte et al., 2015] и кольцесосудистой [Lara, Bravo, Sierra, 2015; von Arx, Dietz, 2005]. Однако следует отметить, что в большинстве упомянутых работ используемые методы автоматизации измерений были протестированы на одном или нескольких видах, что, в свою очередь, свидетельствует о том, что поиск универсального метода, который бы работал для любого вида анатомической древесно-кольцевой структуры или даже для одного типа древесины, является невероятно сложной задачей.

Данная статья является обзором имеющихся на данный момент научных работ по внедрению частично и полностью автоматизированных измерений древесных колец в дендрохронологическую практику.

Получение цифровых изображений древесины

Первым шагом в процедуре обнаружения годовых колец является получение их изображений. В исследованиях, связанных с обработкой изображений годовых колец, наиболее популярными являются изображения поперечных срезов древесины [Kennel, Borianne, Subsol, 2015; Myglan et al., 2020]. Для их получения могут применяться как обычные фотокамеры высокого разрешения (камеры с большим увеличением, либо же подключенные к цифровым микроскопам, позволяющие производить макроснимки), так и всевозможные сканирующие устройства.

Главным недостатком использования стандартных сканирующих устройств является ограниченное разрешение получаемых изображений (как правило, до 1800 dpi), что в свою очередь может привести к искажению информации об узких годовых кольцах, которые впоследствии могут быть пропущены при изучении. Именно поэтому подавляющее число исследователей пользуются специализированными сканерами высокого разрешения. Так, напр., Сибирской дендрохронологической лабораторией (СФУ, Красноярск) была проведена датировка деревянных построек г. Енисейска (выполненная с помощью анализа плотности годовых колец методом «blue intensity») с использованием сканера Epson Perfection V850 Pro с разрешением 2400 dpi [Myglan и др., 2018]. На базе дендрохронологической лаборатории ИГ РАН (Москва) для проведения древесно-кольцевого анализа активно используются изображения, созданные при по-

мощи сканера высокого разрешения Epson Perfection V700 с разрешением 3200 dpi [Семеняк и др., 2022].

Еще одним методом получения изображения, описанным в работе Б. Вагнера и его коллег, является лазерное сканирование древесины при помощи портативного лазерного 3D-сканера Faro ScanArm; однако широкое применение подобного способа кажется мало возможным из-за дороговизны как самого сканера, так и эксплуатации [Wagner et al., 2011, p. 201–210].

Помимо использования сканирующих устройств, создающих изображения поверхности древесины, все большую популярность среди исследователей набирают и изображения внутреннего строения древесины, полученные с помощью рентгеновских лучей (денситометрия, томография). Первой успешной датировкой деревянного объекта на основе компьютерной томографии было произведенное в 2006 г. исследование рукояти инструмента, сделанной из дуба [Grabner, Salaberger, Okochi, 2009, p. 349–352]. После публикации данной работы дендрохронологи по всему миру, один за другим, начали предпринимать успешные попытки использования X-ray томографов в своих исследованиях [Уткин, Филатова, 2021].

В российской дендрохронологии также предпринималась попытка применения компьютерной томографии при исследовании древесины: в 2010 г. совместными усилиями сотрудников ИАЭТ и ИЯФ СО РАН было проведено исследование деревянного изделия методом рентгеновской томографии [Гольдберг, Купер, Слюсаренко, 2010, с. 176–180]. Экспериментальным образцом послужила деревянная бляха в форме усеченного конуса со сквозным отверстием в центре, которая являлась деталью колчана и происходила из кург. 1 могильника Ак-Алаха-1 [Полосьмак, 1994, с. 30]. Однако несмотря на столь активное и достаточно успешное применение описанных выше методов получения цифровых изображений древесины (как ее внешней поверхности, так и внутреннего строения), наиболее распространенным способом получения изображений все еще является использование цифровых фотокамер высокого разрешения (в основном из-за доступности и относительно низкой стоимости необходимого оборудования) [Helama et al., 2016; von Arx and Dietz, 2005].

Исключением не стала и отечественная дендрохронология, где цифровая макрофотосъемка также применяется достаточно активно. Так напр., в 2016 г., сотрудниками ИГ и ИА РАН было проведено исследование трех икон XV–XVII вв., в котором активно применялась макрофотосъемка зачищенных поперечных сечений панелей икон [Matskovsky, Dolgikh, Voronin, 2016].

В 2023 г. на базе Сибирской дендрохронологической лаборатории (Красноярск) была разработана новая методика пробоподготовки поверхности древесных углей и создания древесно-кольцевых хронологий по их цифровым изображениям (древесные угли фотографировались в отраженном свете при $\times 30$ увеличе-

нии с помощью микроскопа Zeiss AXIO Zoom. V16, оснащенного моторизованным предметным столиком) [Мыглан и др., 2023].

Ручное и автоматизированное обнаружение годичных колец

На данный момент в распоряжении дендрохронологов существует несколько программных инструментов, способных в некоторых случаях автоматизировать обнаружение и измерение годичных колец. Эти инструменты включают как коммерческое программное обеспечение (напр., функция автоматического распознавания колец в программе Coorecorder), так и авторские узкоспециализированные программы (SigmaScan, measuRing и т.д.), разработанные исследовательскими группами с использованием инструментов и языков программирования с открытым исходным кодом [Hietz, 2011; Lara, Bravo, Sierra, 2015; Maxwell, Larsson, 2021]. Тем не менее применение данного программного обеспечения по-прежнему требует значительного взаимодействия с пользователем. Кроме того, точность этого программного обеспечения часто ограничивается образцами древесины определенного анатомического типа, подготовленными с использованием определенных процедур (напр., заполнения мелом или шлифования). В противном случае программа часто не может обнаружить границы годичных колец, даже если они явно видны.

Большинство существующих подходов к обнаружению краевых сегментов (границ) годичных колец по-прежнему основано на базовых методах обработки изображений. В них используются вручную заданные функции: специальный набор дескрипторов, полученных на основе анатомических характеристик и внешнего вида годичных колец. К ним относятся: расположение сердцевины [Borianne, Pernaudat, Subsol, 2011], ширина годичных колец [Wang et al., 2010, Zhou et al., 2012], оптическая плотность ранней и поздней древесины [Lara, Bravo, Sierra, 2015; Sioma, Socha, 2016] и некоторые другие характеристики. Такой способ выбора признаков всегда сомнителен, поскольку годичные кольца различаются в зависимости от типа и породы древесины. Даже в случае одной породы деревьев внешний вид годичных колец может существенно различаться у разных образцов, причем порой даже у образцов, взятых с одного и того же ствола дерева. В результате точность и применимость существующих методов существенно ограничена.

Стандартные (т.е. основанные на производных изображениях) детекторы границ являются ядром многих алгоритмов обнаружения границ годичных колец деревьев. В частности, для распознавания границ годичных колец наиболее активно применяются: детектор границ Кэнни, Собеля, Превитта и Робертса [Cerdea, Hirschfeld-Kahler, Mery, 2007; Entacher, Planitzer, Uhl, 2007]. Данные алгоритмы имеют ряд недостатков (напр., чувствительность к шуму, низкая точность в случае малоконтраст-

ных краев) и, т.о., часто дают низкую точность в распознавании границы годовичных колец. Поэтому после этапа обнаружения краевых сегментов требуется их связывание с другими сегментами, принадлежащими одному древесному кольцу. Для этого применяются более сложные подходы. Например, в работе Х.Дж. Вана и др. для получения точного количества границ годовичных колец использовалась обработка линейного расширения (LER). В подходе LER сначала подсчитывается количество пикселей заданной яркости в векторе пикселей. Затем, если это число больше или равно заданному порогу, обнаруживается край [Wang et al., 2010]. В 2018 г. в работе А. Фабиянски и др. был предложен подход к автоматическому обнаружению годовичных колец, основанный на ручном отборе признаков [Fabijanska et al., 2017]. Идея метода заключалась в том, чтобы поместить сегменты линий в локальные пики градиента, представляющие границы годовичных колец. Такой подход практически безукоризнен в случае с хвойной древесиной, где границы годовичных колец проявляются в виде четких тонких линий на контрастном фоне. В случае с рассеянососудистой древесиной результаты все еще были достаточно хорошими. Однако в случае древесины лиственных пород метод столкнулся со значительными проблемами и не смог обнаружить около 50 % годовичных колец. Аналогичное наблюдение было сделано в работе С.Л. Мэйс и др., которая показала, что ограниченная точность на древесине лиственных пород также характерна и для других существующих способов автоматического обнаружения годовичных колец [Maes et al., 2017]. Несмотря на то, что описанные в этих работах алгоритмы в некоторых случаях показывали достаточно большой потенциал (вплоть до 99 % эффективности для хвойных пород деревьев), их низкая точность в анализе других типов древесины ставила перед исследователями совершенно новую проблему, решить которую существующими на тот момент инструментами не представлялось возможным.

Применение сверточных нейронных сетей (CNN) в обнаружении границ древесных колец

Недавние разработки в области машинного обучения все больше доказывают, что ручной выбор признаков может быть успешно заменен автоматическим. В нескольких зарубежных работах стали успешно применять сверточные нейронные сети (далее – CNN) в идентификации, распознавании и обучении признаков, в чем они продемонстрировали довольно высокую производительность [Fabijanska et al., 2017]. Более того, поскольку CNN способны идентифицировать функции, недоступные человеческому восприятию, в некоторых приложениях изученные функции позволяют превзойти человеческую точность. Поэтому в новейших исследованиях CNN применяют для автоматической идентификации и изучения особенностей, связанных с границами годовичных колец в кольцесосудистой древесине, а затем их использования для разграничения годовичных колец на изображениях

сердцевины древесины. При всем этом и обучение сети, и обнаружение годовичных колец выполняются без взаимодействия с пользователем.

Данный, относительно новый подход к обнаружению годовичных колец был протестирован в исследовании 2017 г. [Fabijanska et al., 2017] на ядровой древесине 12 пород деревьев, представляющих каждый из трех основных типов. Примененный метод очень хорошо себя зарекомендовал для хвойных пород деревьев. Относительно хорошие результаты были получены и для рассеянососудистых пород. Результаты для двух пород с кольцесосудистым типом строения древесины (дуб и ясень) оказались неудовлетворительными, т.к. по результатам было выявлено лишь ок. 50 % древесно-кольцевых границ. Авторы пришли к выводу, что в большей степени это связано с особенностями границы годовичных колец в этих породах древесины, определяемыми рядом относительно крупных округлых пор.

Полученные в данной работе результаты заставили авторов данного исследования искать другой подход, который хорошо работал бы для кольцесосудистой древесины. В связи с чем в 2018 г. авторами из того же коллектива было представлено исследование [Fabijanska, Danek, 2018], в котором они успешно применили CNN для обнаружения границ годовичных колец в древесных ядрах, представляющих кольцесосудистый тип древесины. Анализ в нем проводился уже на трех породах деревьев, представляющих данный тип анатомического строения: дуб (*Quercus* sp.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) и вяз (*Ulmus* sp.). Всего в этом исследовании использовался набор данных из 75 различных изображений ядер древесины (33 дуба, 31 ясеня и 11 вяза), содержащий в общей сложности 5 373 годовичных кольца. Пространственное разрешение изображений варьировалось от $2\,281 \times 172$ пикселей до $13\,975 \times 172$ пикселей. Изображения представляли собой цветные изображения RGB, хранящиеся в файлах png. Для обучения нейронной сети использовались участки изображений размером 128×128 пикселей. В общей сложности было использовано 80 000 участков при условии, что из каждой обучающей части изображения было выбрано равное количество участков. Части изображений были получены путем разделения исходных изображений (полос) на непересекающиеся тайлы размером 600×172 пикселя. 80 % участков изображений использовались для обучения, а оставшиеся 20 % – для проверки. К обучающей выборке не применялись методы искусственного увеличения данных.

Наилучшие показатели были отмечены у ясеня обыкновенного (97 % точность в выявлении границ годовичных колец), а наименьшая частота выявления годовичных колец (92 %) – у вяза. Эти результаты, по видимому, связаны с размером обучающих баз данных, использованных для каждой рассматриваемой породы деревьев. Тем не менее использованный авторами подход хорошо идентифицирует границы колец у кольцесосудистых пород деревьев.

В целом предложенный авторами подход позволяет успешно обнаруживать древесно-кольцевые границы разной ширины, структуры и ориентации, достигая конечной степени обнаружения древесно-кольцевых границ на уровне более 95 %. Ключевым преимуществом метода является то, что полученные границы годовых колец точно совпадают с реальными и требуют лишь ограниченного количества ручных исправлений, которые требуются в основном вокруг сердцевины, где границы годовых колец слабые и имеют различный наклон и ориентацию.

Заключение

Разработка полностью автоматического, универсального метода определения границ годовых колец представляет собой сложную задачу, связанную с разнообразием типов анатомических структур разных видов деревьев. Глаз опытного специалиста, вооруженный микроскопом, по-прежнему остается наиболее точным способом исследования годовых колец. Однако такой подход чреват человеческим фактором и требует много времени, что может значительно растянуть процесс анализа, особенно в случае крупномасштабных исследований.

Поиск надежного и универсального метода автоматического определения годовых колец ведется уже несколько десятилетий (с середины 90-х гг.). С тех пор проблема автоматического обнаружения годовых колец рассматривалась несколькими авторами. Однако до настоящего времени проблема не решена комплексно. Одним из возможных способов решения проблемы автоматизации измерений является внедрение в повседневную практику CNN, анализирующих изображения практически автономно, без настройки каких-либо дополнительных параметров. Кроме того, их применение не требует априорных знаний о внешнем виде границ годовых колец, что делает метод универсальным для любой породы древесины. Единственным их недостатком является тот факт, что обучение CNN занимает довольно много времени. Однако следует помнить, что данный процесс необходимо проводить только один раз. Обнаружение границ годовых колец обученной сетью происходит довольно быстро (в описанном выше исследовании на каждый образец зерна древесины уходило в среднем менее одной секунды, что несомненно несравнимо быстрее, чем обнаружение границ годовых колец вручную или полуавтоматическим способом).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2022-0010 «Палеоэкология человека и реконструкция природных условий Евразии в четвертичном периоде».

Список литературы

Гольдберг Е.Л., Купер К.Э., Слюсаренко И.Ю. Предварительные результаты использования метода вычислительной рентгеновской томографии для анализа археологических

деревянных изделий // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2010. – Т. XVI. – С. 176–180.

Карпунин А.А. Дендрохронология в археологии: методические аспекты // Междисциплинарная интеграция в археологии (по мат-лам лекций для аспирантов и молодых сотрудников). – М.: Изд-во ИА РАН, 2016. – С. 52–68.

Мыглан В.С., Агапова А.Р., Непоп Р.К., Тайник А.В., Филатова М.О., Баринов В.В. Новый подход к изучению древесных углей из археологических памятников на примере металлургических печей Юго-Восточного Алтая // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2023. – № 2. – С. 74–84. doi: 10.17746/1563-0102.2023.51.2.074-084

Мыглан В.С., Жарников З.Ю., Сидорова М.О., Баринов В.В., Тайник А.В. Применение метода blue intensity для датирования памятников деревянного зодчества Сибири // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2018. – № 4. – С. 109–113. doi: 10.17746/1563-0102.2018.46.4.109-113

Полосьмак Н.В. Стерегущие золото грифы. – Новосибирск: Наука, 1994. – 125 с.

Семеняк Н.С., Соломина О.Н., Долгова Е.А., Мацковский В.В. Климатический сигнал в различных параметрах годовых колец сосны обыкновенной на Соловецком Архипелаге // Геосферные исследования. – 2022. – № 4. – С. 139–164. doi: 10.17223/25421379/25/10

Уткин М.В., Филатова М.О. Неинвазивная дендрохронология: проблемы и перспективы // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2021. – Т. XXVII. – С. 696–701.

Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-методич. пособие. – Красноярск: Изд-во Крас. гос. ун-та. – 2000. – Ч. I. – 80 с.

Borianne P., Pernaudat R., Subsol G. Automated delineation of tree-rings in X-ray computed tomography images of wood // 18th IEEE Intern. Conference on Image Processing. – 2011. – P. 437–440.

Cerda M., Hirschfeld-Kahler N., Mery D. Robust tree-ring detection // Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, LNCS. – 2007. – Vol. 4872. – P. 575–585.

Conner W.S., Schowengerdt R.A., Munro M., Hughes M.K. Design of a computer vision based tree ring dating system. IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation. – 1998. – P. 256–261.

Entacher K., Planitzer D., Uhl A. Towards an automated generation of tree ring profiles from CT-images // Proc. of the 5th Intern. Symp. on Image and Signal Proc. and Analysis (ISPA'07). – 2007. – P. 174–179.

Fabijanska A., Danek M., Joanna B., Piorkowski A. Towards automatic tree rings detection in images of scanned wood samples // Computers and Electronics in Agriculture. – 2017. – Vol. 140. – P. 279–289. doi: 10.1016/j.compag.2017.06.006

Fabijanska A., Danek M. DeepDendro – A tree rings detector based on a deep convolutional neural network //

Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 150. – P. 353–363. doi: 10.1016/j.compag.2018.05.005

Grabner M., Salaberger D., Okochi T. The need of high resolution μ -X-ray CT in dendrochronology and in wood identification // Proc. of 6th Intern. Symp. on Image and Signal Proc. and Analysis. – 2009. – P. 349–352.

Helama S., Laanelaid A., Santala M., Tanhuanpaa A. Dendrochronological dating of wooden artifacts by measuring the tree rings using magnifying glass and photography-assisted method: an example of a dutch panel painting // Archaeological and Anthropological Sci. – 2016. – Vol. 8 (1). – P. 161–167.

Hietz P. A simple program to measure and analyse tree rings using Excel, R and SigmaScan // Dendrochronologia. – 2011. – Vol. 29 (4). – P. 245–250. doi: 10.1016/j.dendro.2010.11.002

Kennel P., Borianne P., Subsol G. An automated method for tree-ring delineation based on active contours guided by DT-CWT complex coefficients in photographic images: application to abies alba wood slice images // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – Vol. 118. – P. 204–214. doi: 10.1016/j.compag.2015.09.009

Lara W., Bravo F., Sierra C. MeasuRing: an R package to measure tree-ring widths from scanned images // Dendrochronologia. – 2015. – Vol. 34. – P. 43–50. doi: 10.1016/j.dendro.2015.04.002

Latte N., Beeckman H., Bauwens S., Bonnet S., Lejeune P. A. novel procedure to measure shrinkage-free tree-rings from very large wood samples combining photogrammetry, high-resolution image processing, and GIS tools // Dendrochronologia. – 2015. – Vol. 34. – P. 24–28. doi: 10.1016/j.dendro.2015.03.002

Maes S.L., Vannoppen A., Altman J., den Bulcke J.V., Decocq G., Mil T.D., Depauw L., Landuyt D., Perring M.P., Acker J.V., Vanhellemont M., Verheyen K. Evaluating the robustness of three ring-width measurement methods for growth release reconstruction // Dendrochronologia. – 2017. – Vol. 46. – P. 67–76. doi: 10.1016/j.dendro.2017.10.005

Matskovsky V., Dolgikh A., Voronin K. Combined dendrochronological and radiocarbon dating of three Russian icons from the 15th–17th century // Dendrochronologia. – 2016. – Vol. 39. – P. 60–68. doi:10.1016/j.dendro.2015.10.002

Maxwell R.S., Larsson L.A. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application // Dendrochronologia. – 2021. – Vol. 67. – P. 125841. doi: 10.1016/j.dendro.2021.125841

Myglan V.S., Omurova G.T., Barinov V.V., Kardash O.V. Methodological Aspects of Determining Type, Age, and Origin of Archaeological Wood: The Case of Fort Nadym // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. – 2020. – N 3. – P. 80–89. doi: 10.17746/1563-0110.2020.48.3.080-089

Pan S., Kudo M. Segmentation of pores in wood microscopic images based on mathematical morphology with a variable structuring element // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 75 (2). – P. 250–260. doi: 10.1016/j.compag.2010.11.010

Rigozo N.R., Nordemann D.J., Echer E., Vieira L.E.A., Prestes A. An interactive method for digital tree-ring width measurement // Geofisica Internacional-Mexico. – 2004. – Vol. 43 (2). – P. 281. doi: 10.22201/igeof.00167169p.2004.43.2.180

Sheppard P., Graumlich L. A reflected-light video imaging system for tree-ring analysis of conifers. Tree Rings, Environment and Humanity. Radiocarbon 1996. Proc. of the Intern. conf. – 1994. – P. 17–21.

Sioma A., Socha J. Automation of annual tree increment measurement using vision system // Drewno. – 2016. – Vol. 59 (196). – P. 19–30. doi: 10.12841/wood.1644-3985.155.02

Soille P., Misson L. Tree ring area measurements using morphological image analysis // Canadian J. of Forest Research. – 2001. – Vol. 31 (6). – P. 1074–1083. doi: 10.1139/cjfr-31-6-1074

von Arx G., Dietz H. Automated image analysis of annual rings in the roots of perennial forbs // Intern. J. of Plant Sci. – 2005. – Vol. 166 (5) – P. 723–732. doi: 10.1086/431230

Wagner B., Gartner H., Santini S., Ingensand H. Cross-sectional interpolation of annual rings within a 3D root model // Dendrochronologia. – 2011. – Vol. 29 (4). – P. 201–210. doi: 10.1016/j.dendro.2010.12.003

Wang H.J., Qi H.N., Zhang G.Q., Li W.Z., Wang B.H. An automatic method of tree-rings boundary detection on wood micro-images // 2010 Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010). – 2010. – Vol. 2. – IEEE. – P. V2–477.

Zhou H., Feng R., Huang H., Lin E., Yu J. Method of tree-ring image analysis for dendrochronology // Optical Engineering. – 2012. – Vol. 51 (7). doi: 10.1117/1.OE.51.7.077202

References

Borianne P., Pernaudat R., Subsol G. Automated delineation of tree-rings in X-ray computed tomography images of wood. In *2011 18th IEEE Intern. Conf. on Image Proc.*, 2011. P. 437–440.

Cerda M., Hirschfeld-Kahler N., Mery D. Robust tree-ring detection. In *Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*. LNCS, 2007. Vol. 4872. P. 575–585.

Conner, W.S., Schowengerdt, R.A., Munro, M., Hughes, M.K., Design of a computer vision based tree ring dating system. In *IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, 1998. P. 256–261.

Entacher K., Planitzer D., Uhl A. Towards an automated generation of tree ring profiles from CT-images. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA'07)*, 2007. P. 174–179.

Fabijanska A., Danek M. DeepDendro – A tree rings detector based on a deep convolutional neural network. In *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018. Vol. 150. P. 353–363. doi: 10.1016/j.compag.2018.05.005

Fabijanska A., Danek M., Joanna B., Piorkowski A. Towards automatic tree rings detection in images of scanned wood samples. In *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017. Vol. 140. P. 279–289. doi: 10.1016/j.compag.2017.06.006

Gol'dberg Y.L., Kuper K.E., Slyusarenko I.Y. Predvaritelnyye rezultaty ispolzovniya metoda vychislitelnoy rentgenovskoy tomografii dlya analiza arkhelogicheskikh derevyannykh izdeliy. In *Problems of Archaeology, Ethnography and Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 2010. Vol. 16. P. 176–180. (In Russ.).

Grabner M., Salaberger D., Okochi T. The need of high resolution μ -X-ray CT in dendrochronology and in wood

identification. In *Proceedings of 6th Intern. Symposium on Image and Signal Proc. and Analysis*, Salzburg, 2009. P. 349–352.

Helama S., Laanelaid A., Santala M., Tanhuanpaa A. Dendrochronological dating of wooden artifacts by measuring the tree rings using magnifying glass and photography-assisted method: an example of a dutch panel painting. In *Archaeological and Anthropological Sci.*, 2016. Vol. 8 (1). P. 161–167.

Hietz P. A simple program to measure and analyse tree rings using Excel, R and SigmaScan. In *Dendrochronologia*, 2011. Vol. 29 (4). P. 245–250. doi: 10.1016/j.dendro.2010.11.002

Karpukhin A.A. Dendrokronologiya v arkhologii: metodicheskiye aspekty. In *Mezhdistsiplinarnaya integratsiya v arkhologii (po materialam lektsiy dlya aspirantov i molodykh sotrudnikov)*. Moscow: IA RAN Publ., 2016. P. 52–68. (In Russ.).

Kennel P., Borianne P., Subsol G. An automated method for tree-ring delineation based on active contours guided by DT-CWT complex coefficients in photographic images: application to abies alba wood slice images. In *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015. Vol. 118. P. 204–214. doi: 10.1016/j.compag.2015.09.009

Lara W., Bravo F., Sierra C. MeasurRing: an R package to measure tree-ring widths from scanned images. In *Dendrochronologia*, 2015. Vol. 34. P. 43–50. doi: 10.1016/j.dendro.2015.04.002

Latte N., Beeckman H., Bauwens S., Bonnet S., Lejeune P. A novel procedure to measure shrinkage-free tree-rings from very large wood samples combining photogrammetry, high-resolution image processing, and GIS tools. In *Dendrochronologia*, 2015. Vol. 34. P. 24–28. doi: 10.1016/j.dendro.2015.03.002

Maes S.L., Vannoppen A., Altman J., den Bulcke J.V., Decocq G., Mil T.D., Depauw L., Landuyt D., Perring M.P., Acker J.V., Vanhellefont M., Verheyen K. Evaluating the robustness of three ring-width measurement methods for growth release reconstruction. In *Dendrochronologia*, 2017. Vol. 46. P. 67–76. doi: 10.1016/j.dendro.2017.10.005

Matskovsky V., Dolgikh A., Voronin K. Combined dendrochronological and radiocarbon dating of three Russian icons from the 15th–17th century. In *Dendrochronologia*, 2016. Vol. 39. P. 60–68. doi:10.1016/j.dendro.2015.10.002

Maxwell R.S., Larsson L. A. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. In *Dendrochronologia*, 2021. Vol. 67. 125841. doi: 10.1016/j.dendro.2021.125841

Myglan V.S., Agatova A.R., Nepop R.K., Taynik A.V., Filatova M.O., Barinov V.V. A New Approach to the Study of Archaeological Charcoal: The Case of Metallurgical Furnaces of the Southeastern Altai. In *Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia*, 2023. N 2. P. 74–84. (In Russ.). doi:10.17746/1563-0102.2023.51.2.074-084

Myglan V.S., Omurova G.T., Barinov V.V., Kardash O.V. Methodological Aspects of Determining Type, Age, and Origin of Archaeological Wood: The Case of Fort Nadym. *Archaeology, In Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 2020. N 3. P. 80–89. (In Russ.). doi: 10.17746/1563-0110.2020.48.3.080-089

Myglan V.S., Zharnikov Z.Y., Sidorova M.O., Barinov V.V., Taynik A.V. Application of the Blue-Intensity

Method for Dating Wooden Buildings in Siberia. In *Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia*, 2018. N 4. P. 109–113. (In Russ.). doi: 10.17746/1563-0102.2018.46.4.109-113

Pan S., Kudo M. Segmentation of pores in wood microscopic images based on mathematical morphology with a variable structuring element. In *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011. Vol. 75 (2). P. 250–260. doi: 10.1016/j.compag.2010.11.010

Polosmak N.V. Steregushchiye zoloto grify. Novosibirsk: Nauka, 1994. 125 p. (In Russ.)

Rigozo N.R., Nordemann D.J., Echer E., Vieira L.E.A., Prestes A. An interactive method for digital tree-ring width measurement. In *Geofisica Internacional-Mexico*, 2004. Vol. 43 (2). P. 281. doi: 10.22201/igeof.00167169p.2004.43.2.180

Semenyak N.S., Solomina O.N., Dolgova E.A., Matskovsky V.V. Climatic signal in different parameters of tree-rings of pine in the Solovetsky Archipelago. In *Geosphere Research*, 2022 N 4. P. 139–164. (In Russ.). doi: 10.17223/25421379/25/10

Sheppard P., Graumlich L. A reflected-light video imaging system for tree-ring analysis of conifers. In *Tree Rings, Environment and Humanity. Radiocarbon 1996. Proc. of the Intern. Conf.*, 1994. P. 17–21.

Sioma A., Socha J. Automation of annual tree increment measurement using vision system. In *Drewno*, 2016. Vol. 59 (196). P. 19–30. doi: 10.12841/wood.1644-3985.155.02

Shiyatov S.G., Vaganov Y.A., Kirilyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzabayev M.M., Khantemirov R.M. Metody dendrokronologii. Osnovy dendrokronologii. Sbor i polucheniye drevesno-kol'tsevyy informatsii: ucheb.-metodich. posobiye. Krasnoyarsk, 2000. P. I. 80 p. (In Russ.).

Soille P., Misson L. Tree ring area measurements using morphological image analysis. *Canadian J. of Forest Research*, 2001. Vol. 31 (6). P. 1074–1083. doi: 10.1139/cjfr-31-6-1074

Utkin M.V., Filatova M.O. Non-invasive methods in dendrochronology: problems and perspectives. *Problems of Archaeology, Ethnography and Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 2020. Vol. 27. P. 696–701. (In Russ.).

von Arx G., Dietz H. Automated image analysis of annual rings in the roots of perennial forbs. In *Intern. J. of Plant Sci.*, 2005. Vol. 166 (5). P. 723–732. doi: 10.1086/431230

Wagner B., Gartner H., Santini S., Ingensand H. Cross-sectional interpolation of annual rings within a 3D root model. In *Dendrochronologia*, 2011. Vol. 29 (4). P. 201–210. doi: 10.1016/j.dendro.2010.12.003

Wang H. J., Qi H.N., Zhang G.Q., Li W.Z., Wang B.H. An automatic method of tree-rings boundary detection on wood micro-images. In *Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)*, 2010. Vol. 2. P. V2–477.

Zhou H., Feng R., Huang H., Lin E., Yu J. Method of tree-ring image analysis for dendrochronology. In *Optical Engineering*, 2012. Vol. 51 (7). doi: 10.1117/1.OE.51.7.077202

Уткин М.В. <https://orcid.org/0000-0003-2603-7728>
Филатова М.О. <https://orcid.org/0000-0001-5828-4809>