

М.В. Уткин, М.О. Филатова ✉

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

Неинвазивные методы в дендрохронологии: проблемы и перспективы

С развитием новых технологий, в современной дендрохронологии появилось несколько концептуально новых методологических разработок, одной из которых является исследование образцов при помощи так называемых «неинвазивных методов». В данной статье подробно описана история применения макрофотосъемки высокого разрешения, а также компьютерной томографии для исследования деревянных образцов, которые из-за своей высокой историко-культурной и материальной ценности не могут быть изучены традиционными способами. Кроме того, основываясь на результатах зарубежных и отечественных экспериментов по применению данных технологий в дендрохронологии, нами была осуществлена попытка выделить основные проблемы и ограничения в применении методов, а также проанализировать их перспективность как для археологии, так и для других дисциплин. Сделан вывод, что начиная с 2007 г. – с первых попыток использования установок рентгеновской микротомографии (X-ray CT) для измерения ширины годичных колец древесины, успехи в применении данной технологии стали очевидны. Несмотря на несколько неудачных экспериментов, подавляющее большинство исследователей отмечают высокую эффективность метода, а также его перспективность для дальнейших исследований. Что касается применения метода макрофотосъемки, то с появлением в начале 2010-х гг. специализированного программного обеспечения, позволяющего проводить исследования образцов не только на месте, но и дистанционно, данный метод также доказал свою высокую эффективность. Основным его достоинством является относительно низкая стоимость, а также возможность при необходимости в любой момент провести повторное исследование образца. Появление и активное внедрение неинвазивных методов в дендрохронологию может существенно увеличить источниковую базу, доступную для исследователей, добавив к ней большое число археологических артефактов, произведений искусства, а также предметов антиквариата и многого другого.

Ключевые слова: археология, дендрохронология, неинвазивные методы, рентгеновская микротомография, макрофотосъемка высокого разрешения.

M.V. Utkin, M.O. Phylatova ✉

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

Non-Invasive Methods in Dendrochronology: Problems and Perspectives

With the development of new technologies, several conceptually new methodological developments have appeared in the modern dendrochronology, including the study of samples using the so-called “non-invasive methods.” This article details the history of the use of high-resolution macrophotography and computed tomography for studying wooden samples, which, due to their high historical, cultural, and material value, cannot be studied using traditional methods. Moreover, based on the results of foreign and Russian experiments on the use of these technologies in dendrochronology, we have made an attempt to highlight main problems and limitations of the methods, as well as to analyze their prospects both for archeology and other disciplines. A conclusion was made that, since 2007, when the first attempts to use X-ray CTs to measure the width of tree growth rings were made, the success in the use of this technology has become evident. Despite several unsuccessful experiments, the large majority of the researchers note high efficiency of the method, as well as its high potential for further research. As for macrophotography, with the emergence of special software in the early 2010s, which could make it possible to study samples not only in the field, but also remotely, this method also proved to be highly effective. Its main advantage is in its relatively low cost, as well as the ability, when necessary, to re-examine the sample at any point. The emergence and active implementation of non-invasive methods in dendrochronology can significantly increase the source base available to the researchers, adding to it a large number of archaeological artifacts, works of art, as well as antiquities and much more.

Keywords: archeology, dendrochronology, non-invasive methods, X-ray CT, high-resolution macrophotography.

Введение

За последние несколько десятилетий дендрохронология превратилась в один из самых продуктивных и точных методов для археологического и историко-художественного датирования, а также для определения источника происхождения и видового разнообразия древесины. При проведении любого дендрохронологического исследования первым шагом всегда является получение доступа к годичным кольцам на образцах древесины. Поскольку для измерения ширины годичных колец требуется строго поперечный срез древесины, дендрохронологи чаще всего прибегают к деструктивным, инвазивным методам, вроде высверливания кернов из археологических построек и артефактов с помощью специального бура для сухой древесины, применения бензопилы для взятия спилов или же просто разрезания образца [Kuniholm, 2002, р. 63–68]. Во многих случаях такое повреждение археологических объектов можно считать оправданным, учитывая научную ценность точного дендрохронологического датирования, определения древесных пород и происхождения археологической древесины.

Однако в некоторых случаях, использование подобных инвазивных методов является проблематичным, а чаще всего и вовсе невозможным. В особенности, когда объектом исследования являются произведения искусства, музыкальные инструменты, предметы антиквариата или же археологические артефакты. В случае, когда нельзя извлечь образец для анализа, необходимо проводить работы непосредственно на самом объекте. Например, при работе с деревянными панно, исследуются поперечные края досок, из которых это панно состоит. Эти края часто скошены и очень тонкие, а иногда покрыты краской, лаком, воском или другими слоями, которые затрудняют визуализацию годичных колец. В таких случаях поверхность необходимо очистить, для чего обычно используются скальпели (рис. 1). Данный метод также является крайне де-

структивным, а разрешение на проведение подобных работ зачастую невозможно получить.

Помимо данного способа зарубежными дендрохронологами предпринимались попытки минимизировать ущерб образцам, используя для очистки их стенок абразивоструйную, а также лазерные установки [Heginbotham and Pousset, 2006, р. 89]. Однако при их использовании поверхность древесины также подвергается инвазивному вмешательству, хоть и значительно меньшему, чем при ручной зачистке образцов.

Целью данной работы является анализ современных возможностей исследования представляющих историческую и культурную ценность деревянных предметов так называемыми «неинвазивными методами» в дендрохронологии, главными из которых являются цифровая макросъемка высокого разрешения с дальнейшей обработкой данных при помощи специального программного обеспечения и компьютерная томография.

Цифровая макросъемка в дендрохронологии

К началу XXI в. методы регистрации годичных колец заметно улучшились. В самом начале изучения произведений искусства методом дендрохронологии, для измерения ширины колец использовалась увеличительная линза со шкалой, которая достигала в лучшем случае разрешения 0,1 мм, а ширину колец просто записывали на листе бумаги [Fletcher, 1977, р. 335–352]. Другим, менее точным, но также эффективным методом было присвоение относительных значений каждому кольцу [Jansma, Hanraets, Vernimmet, 2004, р. 139–141]. В обоих случаях измерения могли использоваться для перекрестной датировки с другими рядами древесных колец, но отсутствие точности сильно затрудняло этот процесс. Чтобы преодолеть эту проблему, альтернативой являлось измерение годичных колец историко-художественных объектов непосредственно на самом объекте, но с использованием из-

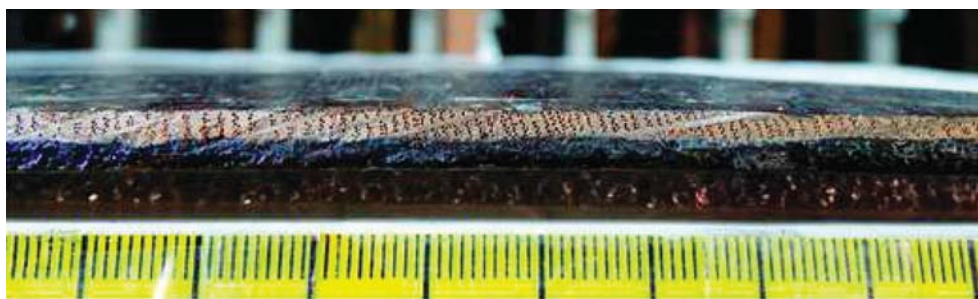


Рис. 1. Дендрохронологическое исследование художественных исторических объектов: поперечный край панно, очищенный ножами-скальпелями (по: [Domínguez-Delmás, 2020]).

мерительного устройства и микроскопа, которые обеспечивают разрешение не менее 0,01 мм. Однако общим ограничением для всех этих трех методов измерения является тот факт, что единственными остаточными сведениями о произведенных измерениях являются лишь записи на бумаге или на более современном этапе – записи в цифровом формате, полученные с помощью измерительных устройств. Следовательно, повторное изучение самих древесных колец объекта становится препятствием, поскольку повторный доступ к предметам, например в музее, получить трудно, поэтому архивирование данных исследуемых образцов стало одной из первостепенных задач всей современной дендрохронологии [Creasman, 2011, p. 103–115].

На современном этапе, благодаря достижениям в области цифровой фотографии, стало возможным измерять годовые кольца на объектах при помощи фотографий, сделанных на месте и одновременно выполнить анализ древесных колец с помощью специальных измерительных устройств. Чаще всего используются приборы типа Video Time Table (рис. 2), которые по своей сути объединяют в себе цифровую видеокамеру высокого разрешения и портативное измерительное устройство, позволяющее манипулировать этой камерой по всем трем



Рис. 2. Дендрохронологический измерительный прибор Video Time Table, использующийся в исследованиях. (по: [Bernabei, Bontadi, Rossi Rognoni, 2010]).

осям координат [Bernabei et al., 2010, p. 192–200]. Кроме того, древесные кольца теперь также можно запечатлеть на цифровых макроснимках в перекрывающейся последовательности для последующего измерения с высокой точностью при помощи специализированного программного обеспечения для анализа изображений, например, PAST4, CooRecorder и т.д. [Rodríguez-Trobajo, Domínguez-Delmás, 2015, p. 148–161].

Благодаря этому, сейчас возможно практически в любой момент получить изображения исследуемых поверхностей, а затем при необходимости использовать их повторно, проверить возможные ошибки, а также начать исследовать другие аспекты.

Данный метод также начинает активно внедряться и в отечественной дендрохронологии. В 2016 г., сотрудниками ИГ и ИА РАН, было проведено исследование трех икон XV–XVII вв., в котором активно применялась макрофото съемка зачищенных поперечных сечений панелей икон [Matskovskiy, Dokgikh, Voronin, 2016, p. 60–68]. Затем, фотографии были объединены и занесены в программу CooRecorder © [CooRecorder basics...], где ширина всех колец была измерена, а на выходе получилось несколько готовых рядов, готовых к перекрестной датировке.

Применение компьютерной томографии в дендрохронологии

В конце 1980-х гг., вдохновившись новейшими разработками в области медицинской компьютерной томографии, в дендрохронологии начался новый этап поисков универсального способа исследования археологических объектов без разрушения и причинения вреда последним. Компьютерная томография (СТ), которая впервые была использована в медицине в 1971 г. позволяла реконструировать участки человеческого тела, не причиняя никакого вреда пациенту, что и с археологической точки зрения действительно являлось многообещающей перспективой. Однако, самые первые эксперименты с археологическими образцами, к сожалению, не увенчались успехом. В частности, эксперименты немецких [Reimers et al., 1989, p. 121–125] и датских [Preuss, Christensen, Peters, 1991, p. 123–130] исследователей показали, что хотя данная методика позволяла различать более твердые и более мягкие части годовых колец в хвойной древесине, разрешение реконструированного разреза (ок. 1 мм) было слишком мало для дендрохронологического датирования.

Полученные результаты, по-видимому, на некоторое время остановили поиски неdestructивных

методов исследования древесины, ведь следующая попытка была осуществлена лишь в начале 2000-х гг., причем уже на другой платформе – промышленном рентгеновском микрофокусном компьютерном томографе (X-ray CT). Подобные аппараты, которые могут обеспечить разрешение вплоть до нескольких микрометров, создавались еще с 80-х гг., но для очень маленьких объектов. Лишь к началу нового тысячелетия они стали достаточно большими, чтобы в них можно было поместить образец достаточного размера для проведения дендрохронологического анализа.

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 [Okochi, Fujii, Mitsutani, 2007, p. 155–164; Dreossi et al, 2009, p. 34–39].

Кроме работ отдельных исследователей, начиная с 2007 г., по всему миру стартовало несколько крупномасштабных международных проектов, целью которых было изучение потенциала рентгеновской томографии при работе с разными породами деревьев (проект DendroCT), а также с древесиной разной степени сохранности (проект ABD). По их результатам была доказана высокая эффективность и ценность X-ray томографа для дендрохро-

нологических исследований [Bill et al., 2012, p. 223–230; Streeton, 2013, p. 1350–1550].

Однако, несмотря на очевидные успехи в применении метода, были и сообщения о неудачных попытках сканирования некоторых пород археологической древесины: в основном они были связаны с тем, что образцы были влажными и контраст между водой и самой древесиной был слишком низок для удачного сканирования [Bill et al., 2012, p. 225].

Но даже при учете подобных неточностей метода, использование технологии сканирования образца вместо традиционного взятия образцов для дендрохронологии имеет несколько очевидных преимуществ. Количество образцов, проанализированных в любом исследовании, обычно ограничивается степенью повреждения археологического материала.

В российской дендрохронологии также предпринималась попытка применения компьютерной томографии при исследовании древесины неинвазивным путем: 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 данного исследования послужила деревянная бляха в форме усеченного конуса со сквозным отверстием в центре, которая являлась деталью колчана (рис. 3) и происходила из кург. 1 могильника Ак-Алаха 1 [Полосьмак, 1994, с. 30]. Образец был небольшого размера (диаметром 37 и высотой 14 мм), изготовлен из тонкослойной древесины и содержал большое количе-

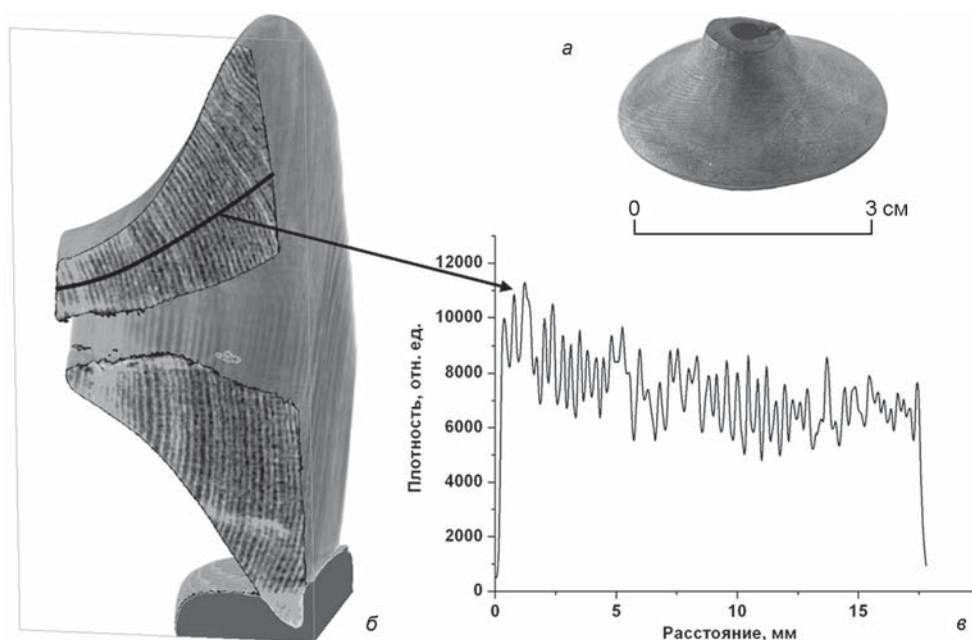


Рис. 3. Исследование деревянного изделия методом вычислительной рентгеновской томографии.

a – общий вид колчанной бляхи из кург. 1 могильника Ак-Алаха-1; *б* – поперечный разрез предмета с обозначенным радиусом измерения; *в* – кривая плотности, отражающая изменчивость ширины годичных колец. (по: [Гольдберг, Купер, Слюсаренко, 2010]).

ство годичных колец, из-за чего он и был выбран для этого исследования. В качестве томографической установки использовалась станция «Томографии и микроскопии» ИЯФ СО РАН. В результате эксперимента было получено полное трехмерное изображение образца с разрешением вплоть до 0,1 мм, что обеспечивало довольно отчетливое различие границ годичных колец, в том числе и достаточно узких. Единственной на тот момент нерешенной проблемой являлась рабочая область детектора установки. Размер пучка синхротронного излучения, а также используемая длина волны рентгеновского излучения, наложили ограничения на размер исследуемых объектов, который на тот момент не мог превышать 50–60 мм в поперечном сечении [Гольдберг, Купер, Слюсаренко, 2010, с. 176–180].

Заключение

Используя техники, основанные на сканировании или фотографировании объектов, мы обнаруживаем, что существует огромный объем информации, который может быть получен без ущерба для материала, поэтому единственным ограничением использования данных методов является лишь финансирование. Поскольку сканирование в промышленном томографе стоит дорого – одно сканирование с последующей реконструкцией часто занимает 2 часа, а нить накала, производящая рентгеновские лучи, изнашивается – использование метода компьютерной томографии требует дополнительных финансовых средств. Однако, задумываясь об этих затратах, следует помнить о том ущербе, который наносится предметам при традиционном отборе образцов: насколько велики затраты на разрезание объекта не только с точки зрения его дальнейшего ремонта или реставрации, но и с позиции потери прочности конструкции, а также в аспекте дальнейшей научной и культурной ценности артефакта. Кроме того, дополнительным преимуществом при работе со сканированием является то, что изображения можно сохранить и повторно изучить в будущем, в то время как при традиционном методе повторное разрешение исследователю могут и не дать.

Появление и активное внедрение неинвазивных методов в дендрохронологию может существенно увеличить источниковую базу, доступную для исследователей, добавив к ней большое число археологических артефактов, произведений искусства, а также предметов антиквариата и многого другого.

Благодарности

Филатова М.О. работала в рамках темы НИР ИАЭТ СО РАН № 0264-2021-0010.

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.
- Полосьмак Н.В.** «Стережущие золото грифы». – Новосибирск: ВО «Наука», 1994. – 125 с.
- Bernabei M., Bontadi J., Rossi Rognoni G.** A dendrochronological investigation of stringed instruments from the collection of the Cherubini Conservatory in Florence, Italy // *Journal of Archaeological Science*. – 2010. – Vol. 37. – P. 192–200. – doi:10.1016/j.jas.2009.09.031.
- Bill J., Daly A., Johnsen O., Dalen K.** DendroCT – Dendrochronology without damage // *Dendrochronologia*. – 2012. – Vol. 30, iss. 3. – P. 223–230. – doi:10.1016/j.dendro.2011.11.002.
- Creasman P.P.** Basic principles and methods of dendrochronological specimen curation // *Tree-Ring Research*. – 2011. – Vol. 67, iss. 2. – P. 103–115. – doi:10.3959/2011-2.1
- CooRecorder basics** [Электронный ресурс] // *Cybis Elektronik & Data AB*. – URL: <https://www.cybis.se/forfun/dendro/helpcoorecorder/> (дата обращения 05.09.2021).
- Dreossi D., Favretto S., Fioravanti M., Mancini L., Rigon L., Sodini N., Tromba G., Zanini F.** Synchrotron radiation micro-tomography: a non-invasive tool for the characterization of archaeological wood // *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*, Firenze University Press. – 2009. – P. 34–39.
- Fletcher J.M.** Tree-ring chronologies for the 6th to 16th centuries for oaks of southern and eastern England // *Journal of Archaeological Science* – 1977. – Vol. 4, iss. 4. – P. 335–352. – doi:10.1016/0305-4403(77)90028-0.
- Grabner M., Salaberger D., Okochi T.** The need of high resolution μ -X-ray CT in dendrochronology and in wood identification // *Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*. – 2009. – P. 349–352. – doi:10.1109/ISPA.2009.5297695.
- Heginbotham A., Pousset D.** The Practical Application of Dendrochronology to Furniture: The Case of the J. Paul Getty Museum's Renaissance Burgundian Cabinet // *Journal of the American Institute for Conservation*. – 2006. – Vol. 45, iss. 2. – P. 89. – doi:10.1179/019713606806112522.
- Jansma E., Hanraets E., Vernimmet T.** Tree-ring research on Dutch and Flemish art and furniture // *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*. – 2004. – Vol. 2. – P. 139–146.
- Kuniholm P.I.** Archaeological dendrochronology // *Dendrochronologia*. – 2002. – Vol. 20, iss. 1–2. – P. 63–68. – doi:10.1078/1125-7865-00008
- 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.

Okochi T., Fujii H., Mitsutani T. Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography // *Dendrochronologia*. – 2007. – Vol. 24, iss. 2–3. – P. 155–164. – doi:10.1016/j.dendro.2006.10.010.

Preuss P., Christensen K., Peters K. The use of computer-tomographical X-ray scanning in dendrochronology // *Norwegian Archaeological Review*. – 1991. – Vol. 24. – P. 123–130.

Reimers P., Riederer J., Goebels J., Ketttschau A. Dendrochronology by means of X-ray computed tomography (CT) // *Archaeometry: Proceedings of the 25th International Symposium*, Elsevier Science. – 1989. – P. 121–125.

Rodríguez-Trobajo E., Domínguez-Delmás M. Swedish oak, planks and panels: dendroarchaeological investigations on the 16th century Evangelistas altarpiece at Seville Cathedral (Spain) // *Journal of Archaeological Science*. – 2015. – Vol. 54, iss. 1–2. – P. 148–161. – doi:10.1016/j.jas.2014.11.039

Streeton N.L.W. Project description: After the Black Death: Painting and Polychrome Sculpture in Norway // *Norwegian Research Council*, Oslo. – 2013. – P. 1350–1550.

References

Bernabei M., Bontadi J., Rossi Rognoni G. A dendrochronological investigation of stringed instruments from the collection of the Cherubini Conservatory in Florence, Italy. *Journal of Archaeological Science*, 2010. Vol. 37. P. 192–200. doi: 10.1016/j.jas.2009.09.031.

Bill J., Daly A., Johnsen O., Dalen K. DendroCT – Dendrochronology without damage. *Dendrochronologia*, 2012, vol. 30, iss. 3, pp. 223–230. doi:10.1016/j.dendro.2011.11.002.

Creasman P.P. Basic principles and methods of dendrochronological specimen curation. *Tree-Ring Research*, 2011. Vol. 67, iss. 2. P. 103–115. doi:10.3959/2011-2.1.

CooRecorder basics. In *Cybis Elektronik & Data AB*. URL: <https://www.cybis.se/forfun/dendro/helpcoorecorder7/> (Accessed: 05.09.2021)

Dreossi D., Favretto S., Fioravanti M., Mancini L., Rigon L., Sodini N., Tromba G., Zanini F. Synchrotron radiation micro-tomography: a non-invasive tool for the characterization of archaeological wood. *Wood Science for Conservation of Cultural Heritage*, Firenze Univ. Press, 2009. P. 34–39.

Fletcher J.M. Tree-ring chronologies for the 6th to 16th centuries for oaks of southern and eastern England. *Journal of Archaeological Science*, 1977. Vol. 4, iss. 4. P. 335–352. doi:10.1016/0305-4403(77)90028-0.

Goldberg Ye.L., Kuper K.E., Slyusarenko I.Yu. Predvaritelnyye rezultaty ispolzovniya metoda vychislitelnoy

rentgenovskoy tomografii dlya analiza arkhelogicheskikh derevyannykh izdeliy. In *Problems of Archaeology, Ethnography and Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*, vol. XXVI. Novosibirsk: IAET SB RAS, 2010. 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. *Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Salzburg, 2009. P. 349–352. doi:10.1109/ISPA.2009.5297695.

Heginbotham A., Pousset D. The Practical Application of Dendrochronology to Furniture: The Case of the J. Paul Getty Museum's Renaissance Burgundian Cabinet. *Journal of the American Institute for Conservation*, 2006. Vol. 45, iss. 2. P. 89. doi: 0.1179/019713606806112522

Jansma E., Hanraets E., Vernimmet T. Tree-ring research on Dutch and Flemish art and furniture. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 2004. Vol. 2. P. 139–146.

Kuniholm P.I. Archaeological dendrochronology. *Dendrochronologia*, 2002. Vol. 20, iss. 1–2. P. 63–68. doi:10.1078/1125-7865-00008.

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

Okochi T., Fujii H., Mitsutani T. Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography. *Dendrochronologia*, 2007. Vol. 24, iss. 2–3. P. 155–164. doi:10.1016/j.dendro.2006.10.010.

Polosmak N.V. «Stereogushchiye zoloto grify». Novosibirsk: Siberian Branch Nauka, 1994, 125 p (In Russ.).

Preuss P., Christensen K., Peters K. The use of computer-tomographical X-ray scanning in dendrochronology. *Norwegian Archaeological Review*, 1991. Vol. 24. P. 123–130.

Reimers P., Riederer J., Goebels J., Ketttschau A. Dendrochronology by means of X-ray computed tomography (CT). *Archaeometry: Proceedings of the 25th International Symposium*, Elsevier Science, 1989. P. 121–125.

Rodríguez-Trobajo E., Domínguez-Delmás M. Swedish oak, planks and panels: dendroarchaeological investigations on the 16th century Evangelistas altarpiece at Seville Cathedral (Spain). *Journal of Archaeological Science*, 2015. Vol. 54, iss. 1–2. P. 148–161. doi:10.1016/j.jas.2014.11.039

Streeton N.L.W. Project description: After the Black Death: Painting and Polychrome Sculpture in Norway. *Norwegian Research Council*, Oslo, 2013. P. 1350–1550.

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