

М.В. Уткин

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

Использование математической статистики в дендрохронологии как инструмента оценки территориального происхождения деревьев (дендропровенансирования)

Благодаря последним изысканиям в области дендропровенансирования древесины (определения ее территориального происхождения), было проведено несколько успешных исследований, определивших точное географическое происхождение множества исторических артефактов и сооружений. Однако использование коэффициента корреляции между рядами годовых колец в качестве индикатора территориальной близости часто подвергается сомнению. Высокая корреляция может наблюдаться между древесно-кольцевыми рядами как на маленьком, так на большом расстоянии, в то же время низкая корреляция также может наблюдаться и между рядами, расположенными близко друг к другу. Это несоответствие побуждает исследователей по всему миру к поиску альтернативных методов определения территориального происхождения древесины, однако многие из них оказываются ненадежными или непрактичными. Ситуация изменилась в 2024 г., когда коллектив итальянских ученых опубликовал работу, посвященную созданию математических функций, связывающих корреляции между древесно-кольцевыми сериями и расстоянием, а также их доверительные интервалы. В данном исследовании было проанализировано ок. 12 000 геолокализованных рядов годовых колец трех основных альпийских хвойных деревьев – ели, лиственницы и пихты – с целью изучения степени, в которой корреляционный анализ может быть использован в качестве инструмента дендропровенансирования. Такой большой набор данных позволил разработать упрощенную модель квантильной регрессии, которую можно было бы использовать для оценки расстояния в километрах на основе значений корреляции между рядами годовых колец. Результаты данной работы ясно указывают на значительное увеличение корреляции между образцами на небольшом расстоянии и подтверждают предлагаемый корреляционный подход. Кроме того, результаты описанного выше исследования позволили оценить степень влияния на дендропровенансирование такого фактора, как высота произрастания деревьев над уровнем моря.

Ключевые слова: дендрохронология, дендропровенансирование, математическая статистика, корреляционный анализ.

M.V. Utkin

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

Use of Mathematical Statistics in Dendrochronology as a Tool for Assessing the Territorial Origin of Trees (Dendroprovenance)

Research of dendroprovenance (establishing the territorial origin of wood) resulted in several successful studies on discovering the exact geographical origin of many artefacts and structures with great historical and archaeological value. However, the use of correlation between tree-ring series as indicator of territorial proximity is often problematic. High correlation may be observed between tree-ring series at both short and long distance, while low correlation may also be observed between the series located quite close to each other. This discrepancy has prompted scholars around the world to search for alternative methods for determining the territorial origin of wood. Unfortunately, many of these methods turned out to be unreliable or impractical. Everything changed in 2024, when a team of Italian scientists created the mathematical functions which linked the correlations between tree-ring series and distance, as well as their confidence intervals. The current study analyzed approximately 12,000 geolocalized tree-ring series belonging to three major alpine conifers – spruce, larch, and fir – for evaluating the extent to which correlation analysis could be used as a dendroprovenance tool. Such large dataset has made it possible to elaborate a simplified quantile regression model which could be used for estimating the distance in kilometers based on the correlation values between tree-ring series. The results of this work clearly indicate a significant increase in correlation at short distances and support the proposed correlation approach. In addition, the study also assessed the impact of altitude on distance estimation and showed how this environmental factor affects variations in dendroprovenance analysis.

Keywords: dendrochronology, dendroprovenance, mathematical statistics, correlation analysis.

Введение

Дендропровенансирование (dendroprovenance) – это раздел дендрохронологии, который занимается определением места происхождения древесины на основе концепции, согласно которой древесно-кольцевые серии деревьев, произрастающие в более схожих природно-климатических условиях, показывают более высокую корреляцию [Ermich et al., 1976]. Самые ранние работы по этой проблеме относятся к 1990-м гг. [Biger, Liphschitz, 1992; Bonde, Tyers, Wazny, 1997] и были основаны на статистическом сравнении с помощью классических дендрохронологических тестов: t-критерия Стьюдента, коэффициента корреляции (r), а также коэффициента G_{lk} (или Gleichlaufigkeit, меры процентного согласия между двумя сериями) [Eckstein, Bauch, 1969]. Благодаря последним изысканиям в области дендропровенансирования древесины, к настоящему времени в мировой практике было проведено несколько успешных исследований, определивших точное географическое происхождение множества артефактов и сооружений, имеющих большое историческое и археологическое значение [Guibal, 1992, Wazny, 2002; Daly, Tyers, 2022].

Для определения наиболее вероятного происхождения древесины дендрохронологи обычно используют корреляционный анализ в сочетании с классическими статистическими тестами, особенно t-тестом. Так, например, они были использованы в исследованиях Бэйли и Пилчера [Bailie, Pilcher, 1973], а также Э. Хольштейна [Hollstein, 1980]. Идея заключается в том, чтобы измерить корреляцию между сериями годовичных колец неизвестного происхождения с геопривязанными эталонными сериями, а затем использовать t-статистику в качестве показателя силы связи и меры пространственной близости [Bridge, 2012].

Однако такая логика не имеет прочной статистической основы, поскольку t-распределение используется только для проверки значимости корреляции, а не в качестве прямой меры ее силы. Кроме того, нельзя не учитывать и более фундаментальные проблемы в работе данного способа, а именно то, что существует большое число экологических переменных, влияющих на определение корреляций между сериями годовичных колец, что, в свою очередь, иногда может существенно повлиять на результаты корреляционного анализа. Например, в исследовании М. Бриджа [Bridge, 2012] сообщается о том, что дубы, растущие на расстоянии более 200 км друг от друга на Британских островах, в некоторых случаях могут демонстрировать более высокую корреляцию, чем дубы, растущие на соседних участках.

Еще одними переменными, влияющими на использование корреляции при определении места произрастания древесины, являются длина и повторность

древесно-кольцевых серий (как в образцах, так и в эталонных сериях). Изменения в количестве образцов и длине рядов делают сигнал нестабильным и сильно влияют на результаты [Bernabei, 2022], поэтому значения корреляционного теста будут выше при большем перекрытии и лучшем повторении древесно-кольцевых рядов [Gut, 2018]. Эти неотъемлемые факторы влияют на корреляционный анализ и в большом ряде случаев не позволяют стандартизировать результаты.

Корреляционный анализ как инструмент дендропровенансирования

Хотя использование корреляционного анализа обычно считается «классическим» методом дендропровенансирования [Cufar, 2007], отсутствие подтверждения потенциала корреляций как выражения близости между хронологиями значительно снижает его достоверность. Для решения этих проблем было предложено несколько вариантов.

Часть исследователей [Haneca et al., 2005] предложили объединять хронологии одних и тех же локальных участков в обобщенные региональные хронологии, которые могут отражать средние условия роста более крупных регионов. А. Дейли в своей диссертации [Daly, 2007] предложил использовать различные уровни географического разрешения, переходя от сравнений с региональными хронологиями к все более локальным хронологиям и отдельным сериям, чтобы постепенно увеличивать пространственное разрешение. Однако этот тип решения подразумевает наличие очень большого количества эталонных рядов с адекватным пространственным распределением, что не всегда возможно и становится все труднее осуществимо при удлинении хронологий в прошлое.

В исследовании 2018 г. Б.Л. Дрейк [Drake, 2018] предложил использовать t-критерий Стьюдента в сочетании с z-критерием значимости для оценки репрезентативности значений t при выявлении возможных источников. В сочетании с байесовской статистикой этот метод позволяет оценить надежность и рассчитать вероятность каждого потенциального локального источника древесины. Позже Урс Гут [Gut, 2020] предлагал использовать «идеальные» псевдохронологии, построенные с помощью статистического моделирования, чтобы преодолеть плохую географическую представительность эталонных рядов, построенных на исторической древесине неясного происхождения. В его работе псевдохронологии строились на основе дендрохронологических рядов живых растений и могут быть продлены в прошлое на неопределенный срок с сохранением локального сигнала.

Классические статистические методы, включающие кластерный анализ [Garcia-Gonzalez, 2008], а также анализ градиента главных компонент [Buras

et al., 2016], полезны для выявления экологических градиентов во временных рядах популяций. Однако они малопригодны в дендроархеологической практике, поскольку требуют полных корреляционных матриц, которые очень трудно получить, если не работать с живыми деревьями. Напротив, временные ряды в исторической области часто оказываются чрезвычайно изменчивыми с точки зрения протяженности и базового периода, и, как следствие, корреляционные матрицы всегда неполны.

К настоящему моменту очевидно, что использование корреляции в анализе дендропровенансирования остается спорным и не получило единодушного признания, несмотря на широкое применение в дендрохронологической и дендроархеологической практике. Отсутствие точной статистической валидации корреляций как дескрипторов пространственного расстояния создает риск субъективного использования корреляционных тестов и может поставить под сомнение результаты уже опубликованных исследований.

В последнее время был изучен потенциал и других возможных способов преодоления этой неопределенности, включая использование, количественной анатомии древесины [von Arx et al., 2016], а также многопараметрических систем [D'Andrea et al., 2024]. Эти методы основаны на извлечении достаточно небольших по размеру образцов древесины, однако получение даже таких образцов практически невозможно для таких объектов, как старинные скрипки, картины на панно или археологические находки. Поэтому, хотя эти методы заслуживают рассмотрения, для большинства объектов культурного наследия они практически не применимы.

Ситуация изменилась в 2024 г., когда коллектив итальянских ученых опубликовал работу [Bernabei, Franceschi, 2024], посвященную созданию математических функций, связывающих корреляции между древесно-кольцевыми сериями и расстоянием, а также их доверительные интервалы. В данном исследовании было проанализировано ок. 12 000 геолокализованных рядов годовых колец трех основных альпийских хвойных – ели обыкновенной (*Picea abies* Karst., PCAB), лиственницы (*Larix decidua* Mill., LADE) и пихты белой (*Abies alba* Mill., ABAL) – с целью изучения степени, в которой корреляционный анализ может быть использован в качестве инструмента дендропровенансирования. Для создания однородного набора данных с минимальной степенью манипуляции были выбраны отдельные ряды годовых колец.

Общее количество хронологий участков составило 447. Наиболее представленным видом была ель (256 участков), за ней следовала пихта (124 участка) и лиственница (67 участков). Сравнения между рядами годовых колец считались достоверными только при наличии более 50 перекрывающихся колец. В качестве меры сходства использовался коэффи-

циент корреляции Пирсона (r). Прямое сравнение со значениями t , которые обычно используются в дендропровенансировании, проводилось путем преобразования r в t следующим образом с референтным перекрытием (n) 100 лет: $t = r * \sqrt{(n - 2) / (1 - r^2)}$ [Ibid.].

При наличии данных о высоте над уровнем моря ряды разделялись на группы с высокой и низкой высотой для оценки влияния данного показателя на корреляции. Для этой цели для каждого вида был определен разный порог для разделения участков на малых и больших высотах, на основе их естественного ареала распространения [Ibid.]. Анализ проводился на основе исходных данных (без процедуры детрендинга) и с использованием ряда методов детренда, включая кубический сглаживающий сплайн [Cook, Peters, 1981], 5-летнее скользящее среднее и логарифмическое преобразование для расчета t -критерия Стьюдента, а также метод суперсглаживания Фридмана [Friedman, Silverman, 1989].

Результаты исследования показали, что в пределах одного вида существует прямая связь между корреляцией и расстоянием, но эта связь теряет свою эффективность при сравнении разных видов. Исследователями было предложено линейное уравнение для реконструкции расстояния в километрах между рядами как функции корреляционных тестов с различными доверительными интервалами. В целом уравнения для отдельных видов и общее уравнение для трех хвойных демонстрируют сопоставимые статистические характеристики и обеспечивают приемлемую оценку расстояния. Ель обеспечила наиболее точную оценку, а пихта – наихудшие результаты. Высота над уровнем моря также влияла на результаты. Хотя как на малых, так и на больших высотах связь между корреляциями и расстоянием остается значимой для трех видов, корреляции на малых высотах, как правило, дают отрицательные значения даже на коротких расстояниях, поэтому они менее надежны.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что данное исследование отчетливо демонстрирует, что корреляционный анализ действительно может быть использован для оценки территориального происхождения деревьев, особенно при наличии высоких значений корреляции для относительно длинных рядов годовых колец. Однако несмотря на то, что использовать значения корреляции в качестве индикаторов близости может быть вполне целесообразно, важно помнить, что это статистическая процедура основана на вероятностных результатах (и что зависимость между корреляциями и расстоянием подчиняется полулогарифмической функции). Это означает, что, хотя высокие значения корреляции обеспечивают хорошую оценку расстояния, точность быстро снижается по мере уменьшения значений корреляции.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2025-0005 «Природные условия обитания древнего человека в четвертичном периоде Евразии».

Список литературы

Bailie M.G.L., Pilcher J.R. A simple cross-dating programme for tree-ring research // *Tree-Ring Bull.* – 1973. – No. 33. – P. 7–14.

Bernabei M. Is a T-test value > 10 really reliable in identifying wood from the same tree trunk? // *Dendrochronologia.* – 2022. – No. 76 (4). – Article 126025. – doi:10.1016/j.dendro.2022.126025

Bernabei M., Franceschi P. Correlation between tree-ring series as a dendroprovenancing evaluation tool // *Science of The Total Environment.* – 2024. – Vol. 954. – Article 176516. – doi:10.1016/j.scitotenv.2024.176516

Biger G., Liphshitz N. Tree ring and dendrohistorical investigations in Israel e the use of imported timber in 19th century Israel // *Tree-rings and Environment, Lundqua Report 34 Proc. of the Intern. Dendrochronology Symp.* – Sweden. – 1992. – P. 30–33.

Bonde N., Tyers I., Wazny T. Where does the timber come from? Dendrochronological evidence of the timber trade in Northern Europe // *Archaeological Sciences 1995.* – Oxford: Oxbow Books, 1997. – P. 201–204.

Bridge M. Locating the origins of wood resources: a review of dendroprovenancing // *J. of Archaeol. Sci.* – 2012. – Vol. 39 (8). – P. 2828–2834. – doi:10.1016/j.jas.2012.04.028

Buras A., Van Der Maaten-Theunissen M., Van Der Maate E., Ahlgrimm S., Hermann P., Simard S., Heinrich I., Helle G., Unterseher M., Schnittler M., Eusemann P., Wilmking M. Tuning the voices of a choir: detecting ecological gradients in time-series populations // *PloS One.* – 2016. – Vol. 11 (7). – P. 1–21. – doi:10.1371/journal.pone.0158346

Cook E.R., Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies // *Tree-Ring Bull.* – 1981. – Vol. 41. – P. 45–53.

Cufar K. Dendrochronology and past human activity – a review of advances since 2000 // *Tree-Ring Research.* – 2007. – Vol. 63 (1). – P. 47–60. – doi:10.3959/1536-1098-63.1.47

Daly A. Timber, trade and tree-rings. A Dendrochronological Analysis of Structural Oak Timber in Northern Europe, c. AD 1000 to c. AD 1650. – Esbjerg: Univ. of Southern Denmark Press, 2007. – 288 p.

Daly A., Tyers I. The sources of Baltic oak // *Journal of Archaeological Science.* – 2022. – Vol. 139. – Article 105550. – doi:10.1016/j.jas.2022.105550

D’Andrea R., Corona C., Poszwa A., Belingard C., Domínguez-Delmás M., Stoffel M., Crivellaro A., Crouzevalle R., Cerbelaud F., Costa G., Paradis-Grenouillet S. Combining conventional tree-ring measurements with wood anatomy and strontium isotope analyses enables dendroprovenancing at the local scale // *Science of The Total*

Environment. – 2024. – Vol. 858 (6). – Article 159887. – doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159887

Drake B.L. Source & Sourceability: towards a probabilistic framework for dendroprovenance based on hypothesis testing and Bayesian inference // *Dendrochronologia.* – 2018. – No. 47. – P. 38–47. – doi:10.1016/j.dendro.2017.12.004

Ermich K., Rutkowski B., Bednarz Z., Feliksik B. The degree of similarity of dendrochronological curves as an indicator of site conditions // *Tree-Ring Bulletin.* – 1976. – No. 36. – P. 1e8.

Eckstein D., Bauch J. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit // *Forstwissenschaftliches Centralblatt.* – 1969. – № 88 (1). – P. 230–250. – doi:10.1007/BF02741777

Friedman J.H., Silverman B.W. Flexible parsimonious smoothing and additive modeling // *Technometrics.* – 1989. – No. 31 (1). – P. 3–21.

Garcia-Gonzalez I. Comparison of different distance measures for cluster analysis of tree-ring series // *Tree-Ring Research.* – 2008. – Vol. 64. – P. 27–37. – doi:10.3959/2007-2.1

Guibal F.F. First dendrochronological dating of a shipwreck in the western Mediterranean area // *Dendrochronologia.* – 1992. – № 10. – Article 147e156.

Gut U. Evaluating the key assumptions underlying dendro-provenancing: how to spruce it up with a scissor plot // *Dendrochronologia.* – 2018. – No. 52. – P. 131–145. – doi:10.1016/j.dendro.2018.09.008

Gut U. Assessing site signal preservation in reference chronologies for dendroprovenancing // *PloS One.* – 2020. – Vol. 15 (9). Article e0239425. – doi:10.1371/journal.pone.0239425

Haneca K., Wazny T., Van Acker J., Beeckman H. Provenancing Baltic timber from art historical objects: success and limitations // *J. of Archaeol. Sci.* – 2005. – Vol. 32. – P. 261–271. – doi:10.1016/j.jas.2004.09.005

Hollstein E. Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte // *Trier Grabungen und Forschungen 11.* – Mainz am Rhein: Verlag Phillipp von Zabern, 1980.

von Arx G., Crivellaro A., Prendin A.L., Cufar K., Carrer M. Quantitative wood anatomy. Practical guidelines // *Frontiers in Plant Science.* – 2016. – № 7. – P. 1–13. – doi:10.3389/fpls.2016.00781

Wazny T. Baltic timber in Western Europe // *Dendrochronologia.* – 2002. – № 20 (3). – P. 313–320. – doi:10.1078/1125-7865-00024

References

Bailie M.G.L., Pilcher J.R. A simple cross-dating programme for tree-ring research. In *Tree-Ring Bull.* 1973. Vol. 33. P. 7–14.

Bernabei M. Is a T-test value > 10 really reliable in identifying wood from the same tree trunk? In *Dendrochronologia.* 2022. Vol. 76 (4). Article 126025. doi:10.1016/j.dendro.2022.126025

Bernabei M., Franceschi P. Correlation between tree-ring series as a dendroprovenancing evaluation tool. In *Science of The Total Environment.* 2024. Vol. 954. Article 176516. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.176516

- Biger G., Liphschitz N.** Tree ring and dendrohistorical investigations in Israel e the use of imported timber in 19th century Israel. In *Tree-rings and Environment, Lundqua Report 34 Proc. of the Intern. Dendrochronolgy Symp.*, Sweden, 1990.
- Bonde N., Tyers I., Wazny T.** Where does the timber come from? Dendrochronological evidence of the timber trade in Northern Europe. In *Archaeological Sciences 1995*. Oxford: Oxbow Books, 1997. P. 201–204.
- Bridge M.** Locating the origins of wood resources: a review of dendroprovenancing. In *J. of Archaeol. Sci.* 2012. Vol. 39 (8). P. 2828–2834. doi:10.1016/j.jas.2012.04.028
- Buras A., Van Der Maaten-Theunissen M., Van Der Maate E., Ahlgrimm S., Hermann P., Simard S., Heinrich I., Helle G., Unterseher M., Schnittler M., Eusemann P., Wilmking M.** Tuning the voices of a choir: detecting ecological gradients in time-series populations. In *PloS One*. 2016, Vol. 11 (7). P. 1–21. doi:10.1371/journal.pone.0158346
- Cook E.R., Peters K.** The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. In *Tree-Ring Bull.* 1981. Vol. 41. P. 45–53.
- Cufar K.** Dendrochronology and past human activity – a review of advances since 2000. In *Tree-Ring Research*. 2007. Vol. 63 (1). P. 47–60. doi:10.3959/1536-1098-63.1.47
- Daly A.** Timber, trade and tree-rings. A Dendrochronological Analysis of Structural Oak Timber in Northern Europe, c. AD 1000 to c. AD 1650, Esbjerg, Univ. of Southern Denmark Press, 2007. 288 p.
- Daly A., Tyers I.** The sources of Baltic oak. In *J. of Archaeol. Sci.* 2022. Vol. 139. Article 105550. doi:10.1016/j.jas.2022.105550
- D’Andrea R., Corona C., Poszwa A., Belingard C., Domínguez-Delmás M., Stoffel M., Crivellaro A., Crouzevialle R., Cerbelaud F., Costa G., Paradis-Grenouillet S.** Combining conventional tree-ring measurements with wood anatomy and strontium isotope analyses enables dendroprovenancing at the local scale. In *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 858 (6), Article 159887. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159887
- Drake B.L.** Source & Sourceability: towards a probabilistic framework for dendroprovenance based on hypothesis testing and Bayesian inference. In *Dendrochronologia*. 2018. Vol. 47. P. 38–47. doi:10.1016/j.dendro.2017.12.004
- Ermich K., Rutkowski B., Bednarz Z., Feliksik B.** The degree of similarity of dendrochronological curves as an indicator of site conditions. In *Tree-Ring Bulletin*. 1976. Vol. 36. P. 1e8.
- Eckstein D., Bauch J.** Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. In *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 1969. Vol. 88 (1). P. 230–250. doi:10.1007/BF02741777
- Friedman J.H., Silverman B.W.** Flexible parsimonious smoothing and additive modeling. In *Technometrics*. 1989. Vol. 31 (1). P. 3–21.
- Garcia-Gonzalez I.** Comparison of different distance measures for cluster analysis of tree-ring series. In *Tree-Ring Research*. 2008. Vol. 64. P. 27–37. doi:10.3959/2007-2.1
- Guibal F.F.** First dendrochronological dating of a shipwreck in the western Mediterranean area. In *Dendrochronologia*. 1992. Vol. 10. Article 147e156.
- Gut U.** Evaluating the key assumptions underlying dendro-provenancing: how to spruce it up with a scissor plot. In *Dendrochronologia*. 2018. Vol. 52. P. 131–145. doi:10.1016/j.dendro.2018.09.008
- Gut U.** Assessing site signal preservation in reference chronologies for dendroprovenancing. In *PloS One*. 2020. Vol. 15 (9). Article e0239425. doi:10.1371/journal.pone.0239425
- Haneca K., Wazny T., Van Acker J., Beeckman H.** Provenancing Baltic timber from art historical objects: success and limitations. In *J. of Archaeol. Sci.* 2005. Vol. 32. P. 261–271. doi:10.1016/j.jas.2004.09.005
- Hollstein E.** Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte. In *Trier Grabungen und Forschungen 11*, Mainz am Rhein: Verlag Phillipp von Zabern, 1980.
- von Arx G., Crivellaro A., Prendin A.L., Cufar K., Carrer M.** Quantitative wood anatomy. Practical guidelines. In *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. P. 1–13. doi:10.3389/fpls.2016.00781
- Wazny T.** Baltic timber in Western Europe. In *Dendrochronologia*. 2002. Vol. 20 (3). P. 313–320. doi:10.1078/1125-7865-00024
- Уткин М.В. <https://orcid.org/0000-0003-2603-7728>
- Дата сдачи рукописи: 01.09.2025 г.