

М.В. Уткин✉, М.О. Филатова

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

Использование изотопов кислорода в дендрохронологии для межвидовой датировки исторической древесины: зарубежный опыт

Дендрохронология является достаточно эффективным методом датирования древесины, но у нее существует несколько ограничений, из-за которых календарные даты установить удается не всегда. При быстром и неограниченном росте деревьев у них формируются «благодушные» древесные кольца (постоянной и практически неизменной ширины), которые не имеют значимой взаимной корреляции и, следовательно, не могут быть датированы дендрохронологически. Эффективным способом точного датирования подобных деревьев, растущих в осадочувствительных регионах умеренного климатического пояса, является недавно разработанный метод датирования древесины с использованием стабильных изотопов кислорода. Он основан на измерении соотношений изотопов в целлюлозе поздней древесины годовичных колец и их сравнении с мастерской хронологией изотопов кислорода известного возраста. В 2021 г. на территории Великобритании было проведено исследование, целью которого было установить межвидовую изотопную когерентность недубовых пород деревьев с особым акцентом на ее применение для датирования исторических строений и артефактов Северо-Западной Европы. Учеными сравнивались образцы живой и исторической древесины известного и неизвестного возраста с мастерской хронологией дуба, построенной по южно-центральной части Великобритании, а их когерентность и потенциал датирования оценивался с использованием мастерской изотопной хронологии. В результате было успешно датировано 14 из 16 образцов, что в свою очередь указывает на значительный потенциал в дальнейшем применении и развитии метода. Несмотря на то, что на данный момент эффективность применения изотопного анализа в дендрохронологии была доказана только для широколиственных лесов умеренно-морской климатической зоны, судя по всему, данный метод должен работать и в зоне континентального климата, в т.ч. и на территории Западной Сибири.

Ключевые слова: дендрохронология, изотопный анализ, стабильные изотопы кислорода, историческая древесина, межвидовой анализ древесины.

M.V. Utkin✉, M.O. Phylatova

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

Use of Oxygen Isotopes in Dendrochronology for Interspecies Dating of Historical Wood: International Experience

Although dendrochronology is a relatively effective dating method, it has several limitations which sometimes hamper establishing reliable dates. Rapid or unrestricted tree growth may lead to invariant time series which do not have significant cross-correlation and thus cannot be dated dendrochronologically. An effective way to accurately date the growth of such trees in humid temperate regions (where growth is not controlled by climate) is the recently developed method of dating wood by stable oxygen isotopes. It is based on measuring isotope ratios in the cellulose of late tree-ring wood and their objective comparison with master oxygen isotope chronology of the already known age. Research aimed at establishing cross-species isotope coherence in non-oak trees with a particular focus on its application to dating historic buildings and artefacts in Northwest Europe was conducted in the UK in 2021. Scientists compared samples of living and historic wood of known and unknown ages with master oak chronology built across the south-

central UK; their coherence and dating capacity was assessed by using master isotope chronology. As a result, 14 out of 16 samples were successfully dated, which in turn indicates a great capacity for further application and development of that method. Despite the fact that effectiveness of isotope analysis in dendrochronology has been presently proven only for broad-leaved forests of the temperate-marine climatic zone, apparently, this method should also work in the continental climate zone including Western Siberia.

Key words: dendrochronology, isotopic analysis, stable oxygen isotopes, historical wood, interspecies analysis of wood.

Введение

Во многих регионах мира до наших дней сохранилось большое количество архитектурной исторической древесины, которая может быть использована в т.ч. и для дендрoarхеологических исследований (а именно – для создания древесно-кольцевых хронологий, по которым могут быть датированы археологические объекты). Породы деревьев, которые использовались для строительства исторических зданий, различаются в зависимости от региона, а также зачастую от их функционального значения.

В Великобритании, Ирландии и почти на всех равнинных территориях континентальной Европы доминирующей породой в строительстве являлся дуб (*Quercus petraea/Quercus robur*) [Loader et al., 2021, p. 1]. Он применялся практически во всех структурных элементах, контактирующих с почвой, а также при создании деревянных каркасов и кровельных конструкций. Долговечность дуба, его устойчивость к разложению, а также достоверность информации, которую можно получить, анализируя его кольца, и относительная его распространенность на территории Европы позволили ученым разработать большое число региональных и локальных древесно-кольцевых хронологий, охватывающих от нескольких сотен до тысяч лет [Hollstein, 1980; Baillie, 1990; Wilson, Miles, Loader, 2013]. При наличии в этих регионах подходящего археологического материала, эти мастерские хронологии успешно применялись и продолжают применяться для его абсолютного датирования. Кроме того, изобилие и широкое распространение в пространстве дубовой древесины на протяжении большей части последних двух тысячелетий позволило разработать сети хронологий, позволяющие при анализе пространственной корреляции исследовать торговые и транспортные связи Европы, а также географическое происхождение строительной древесины [Bridge, 2000; Domínguez-Delmás et al., 2013].

Другими распространенными видами древесины, регулярно используемыми в строительстве исторических зданий Европы, являются: пихта серебристая (*Abies alba*), ель (*Picea abies*), сосна (*Pinus sylvestris*) и лиственница (*Larix decidua*). Кроме того, иногда встречаются материалы из ро-

дов *Castanea* (каштан), *Alnus* (ольха), *Ulmus* (вяз), *Fraxinus* (ясень) и *Fagus* (бук). Их использование варьируется в зависимости от географической и хронологической принадлежности постройки, а также предпочтений в местных стилях строительства [Tegel et al., 2022, p. 14–15].

На данный момент, для некоторых регионов центральной континентальной Европы уже построено несколько продолжительных древесно-кольцевых хронологий по некоторым из вышеперечисленных видов деревьев. Однако из-за того, что их хронологический и географический охват является далеко не полным, довольно часто ученые, датирующие древесину не дубовых пород деревьев, сталкиваются с серьезными трудностями [Loader et al., 2021, p. 2]. И как следствие, участки и элементы исторических сооружений, состоящих в значительной части из материала, отличного от дуба, зачастую могут просто не быть отобраны с памятника в связи с высоким риском неудачи и ограничений бюджета исследования. В результате довольно значительная и важная часть исторических зданий Великобритании и Северо-Западной Европы остается в большой степени неизученной или изученной только частично.

В попытке пополнить базы данных хронологиями, построенными по менее представленным видам деревьев региона, некоторые исследователи предпринимали попытки межвидового датирования древесины при помощи анализа ширины древесных колец. Несмотря на то, что существует несколько заявлений об успешном межвидовом датировании пород [Hillam et al., 1990; Шиятов и Хантемиров, 2000; Billamboz, 2008], полученные результаты часто считаются ориентировочными или предварительными, т.к. хронология, необходимая для убедительной хронологической привязки древесины по каждому отдельному виду, просто недоступна. В некоторых исследованиях межвидовое датирование подтверждалось с помощью метода wiggle-matching по радиоуглероду [Bridge et al., 2019], а также по Событиям Мяяке [Barret, Brown, Plunkett, 2019]. Однако в данной статье особое внимание будет уделено недавно разработанному методу использования стабильных изотопов кислорода, продемонстрировавшему довольно существенный потенциал в межвидовом датировании.

Ограничения метода измерения ширины годичных колец для умеренной климатической зоны и способы их решения

Дендрохронология является достаточно эффективным методом датирования, но у него существует несколько ограничений, из-за которых метод не всегда может установить календарные даты древесных колец. Для большинства деревьев, произрастающих в умеренном климате, ширина годичных колец зависит далеко не только от температуры [Loader et al., 2008; Wilson et al., 2013]. Формирование большого количества благодушных колец у деревьев может привести к инвариантным временным рядам, которые не будут иметь значимой взаимной корреляции и, следовательно, не смогут датироваться дендрохронологически. Кроме того, ширина колец некоторых пород древесины может резко меняться из-за различных нарушений роста, таких как болезни, дефолиация, а также из-за некоторых методов ведения лесного хозяйства (вроде опыления, прореживания и т.п.). Подобные отклонения также могут сделать невозможным датирование образцов с помощью ширины годичных колец [Napesa et al., 2009].

При работе в таких регионах для безопасного датирования обычно требуются образцы, которые имеют непрерывные последовательности из не менее чем 80, а чаще и более 100 колец. Такие длинные ряды встречаются далеко не на всех исторических постройках и деревянных артефактах. Строения, возведенные из быстрорастущих молодых бревен с практически неизменной шириной колец, обычно считаются непригодными для дендрохронологии, поэтому образцы с них берутся редко, а их хронологическая атрибуция остается неизвестной [Loader et al., 2019, p. 478].

Первым способом, позволяющим выйти из сложившейся ситуации и датировать подобного рода древесину, является привлечение других, более чувствительных к изменению окружающей среды параметров годичного кольца, которые позволяют обойти существующие ограничения. Исходя из оценки эффективности, довольно широкие перспективы открывает метод blue intensity (BI), основанный на измерении оптической плотности древесины [Larsson, 2013; Rydval et al., 2014]. Суть метода состоит в измерении интенсивности отраженного годичными кольцами синего света. Чем плотнее древесина, тем она темнее и тем меньше величина отраженного света. Исследователями установлено, что корреляция между максимальной плотностью и отражением выше в голубом спектре, поэтому метод получил название «ин-

тенсивность голубого» (blue intensity) [Долгова, 2017, с. 209–210].

В России данный метод активно применяется сотрудниками «Сибирской дендрохронологической лаборатории» (Красноярск) под руководством В.С. Мыглана: при помощи метода «blue intensity» ими было датировано несколько архитектурных построек г. Енисейска [Мыглан и др., 2018]. В своем исследовании авторы наглядно показали, что данный метод открывает новые возможности для датировки архитектурных построек умеренной климатической зоны Сибири.

Еще одним способом точного датирования быстрорастущих, инвариантных годичных колец и деревьев осадочувствительных регионов умеренного климатического пояса является недавно разработанный метод датирования древесины с использованием стабильных изотопов кислорода. Он основан на измерении соотношений изотопов в целлюлозе поздней древесины годичных колец и их объективном сравнении с мастерской хронологией изотопов кислорода уже известного возраста. В условиях, где невозможно применить хронологию, построенную по ширине годичного кольца, данный метод продолжает работать, потому что деревья сохраняют сильный общий изотопный сигнал от летних осадков, из-за чего им не нужно подвергаться физиологическому стрессу для регистрации сигнала датирования.

Сигнал изотопов кислорода в поздней древесине, используемый для датирования, в первую очередь отражает изменения соотношения изотопов в осадках, отобранных деревьями в течение вегетационного периода [Loader et al., 2019, p. 480]. Для того, чтобы отразить межгодовую изменчивость в сигнале изотопов, деревьям не нужно подвергаться физиологическому стрессу. Это в свою очередь означает, что данный метод будет работать даже там, где у деревьев наблюдается благодушный рост древесных колец (т.е. рисунок ширины годичных колец остается почти неизменным). Подобного рода быстрорастущие деревья с широкими кольцами распространены на большей части умеренного климатического пояса [Ibid.].

В последние годы этот метод уже применялся для исследования древесины, которую не удалось датировать при помощи хронологии по ширине годичных колец, а также древесины, считавшейся непригодной для подобной датировки. Н.Дж. Лоадер и В.Р. Свитсур [Loader and Switsur, 1996] использовали изотопы углерода для датировки событий, вызвавших нарушения роста у сосен обыкновенных, а Дж. Роден [Roden, 2008] в своей работе продемонстрировал, что изотопы кислорода и углерода могут дополнять дендрохронологию, исполь-

зую специализированную программу для дендрохронологических исследований COFESHA с целью изучить силу корреляции в живых деревьях.

В последующих исследованиях когерентность изотопов кислорода с разной степенью успеха использовалась как вспомогательный метод для подтверждения построенных хронологий в реконструкциях палеоклимата, а также с целью продемонстрировать высокую корреляцию между деревьями [Xu, Sano, Nakatsuka, 2013; Baker, Hunt, Clerici, 2015].

Например, в 2018 г. в Японии было успешно проведено исследование по сопоставлению изотопов кислорода из образцов хвойных пород, погребенных под оползнями в Японии, с хронологией, разработанной на основе долгоживущих деревьев известного возраста [Yamada, Kariya, Kimura, 2018]. Кроме того, японскими учеными была предпринята попытка использовать изотопы кислорода в сочетании с радиоуглеродным датированием высокого разрешения для определения даты образцов, извлеченных из японского храма [Sakamoto, Nakozaki, Nakao, 2017].

Межвидовая датировка исторической древесины при помощи изотопов кислорода

Модели, отражающие особенности изотопного фракционирования показывают, что в условиях одной и той же среды и общего источника воды деревья будут регистрировать одинаковый изотопный сигнал в своих кольцах [Roden et al., 2008]. Однако различия в фенологии, морфологии листьев, анатомии древесины, глубине укоренения, физиологии и реакции на климат изменяют изотопный сигнал, сохраняющийся в целлюлозе годичных колец [Ibid.]. Несмотря на это, там, где все вышеперечисленные факторы будут достаточно схожими, химический состав древесины в годичных кольцах должен демонстрировать высокую степень межгодовой изотопной когерентности, что в свою очередь даст возможность точно датировать древесину различных видов с использованием мастерской хронологии, построенной по изотопам кислорода всего одного вида деревьев.

Для подтверждения данной гипотезы в 2021 г. на территории Великобритании было проведено исследование [Loader et al., 2021], целью которого было установить межвидовую изотопную когерентность недубовых пород деревьев с особым акцентом на ее применение для датирования исторических строений и артефактов Северо-Западной Европы. Учеными сравнивались образцы живой и исторической древесины известного и неизвестного возраста с мастерской хронологией дуба, по-

строенной по южно-центральной части Великобритании, а их когерентность и потенциал датирования оценивался с использованием мастерской изотопной хронологии.

В рамках работы исследователями были отобраны образцы шести разных пород деревьев (ольха, ясень, бук, черный тополь, каштан, вяз). Образцы были отобраны с живых деревьев и из исторических образцов древесины со всего юга и запада Великобритании. Временные ряды изотопов были датированы относительно мастерской хронологии изотопов кислорода (1200–2000 гг. н.э.) [Loader et al., 2019], а для того, чтобы учитывать современные керны, образцы которых были отобраны совсем недавно, хронология была расширена с использованием живых деревьев.

Датирование проводилось путем пошагового сравнения изотопных серий (индексов) отфильтрованных образцов со всеми возможными позициями полного перекрытия в стандартизированной мастерской хронологии. Коэффициенты корреляции Пирсона рассчитывались для каждой позиции со степенями свободы, с поправкой на автокорреляцию и влияние фильтра. Полученные вероятности были скорректированы для множественного тестирования с использованием «поправки Бонферрони» [Dunn, 1961].

В результате из 16 образцов шести разных видов деревьев, рассмотренных в рамках исследования, только 2 образца показали недостаточно значимые коэффициенты корреляции с мастерской хронологией. Исследователи связывают это с тем фактом, что оба образца были отобраны на западе Великобритании, во влажной и заболоченной среде далеко за пределами исходного региона мастерской хронологии, из-за чего керны не смогли датировать. Датирование же оставшихся 14 образцов прошло довольно успешно: все коэффициенты корреляции Пирсона были в диапазоне от 0.545 до 0.758. Наблюдаемая изменчивость в полученных данных, скорее всего, отражает физические различия деревьев, их микроокружение, а также хронологическое положение образцов внутри хронологии.

На примере данной работы авторами было показано, что метод датирования изотопов кислорода может успешно применяться для сравнения древесины разных видов деревьев (в данном случае – на примере территории Великобритании) и быть довольно полезным инструментом в руках дендрархеологов. Отсутствие изменчивости в ширине колец, по всей видимости, никак не влияет на изотопный сигнал, и вполне вероятно, что многие деревянные конструкции, вырезанные из молодых быстрорастущих деревьев, в будущем будут пригодны для изотопного датирования.

Проанализировав работы, посвященные применению изотопов кислорода в дендрохронологии, можно сформулировать несколько фундаментальных выводов о его потенциале. Во-первых, данные, полученные при анализе изотопов кислорода из годовых колец деревьев, довольно точны и даже в необработанном, нефилтрованном виде подходят для корреляционного анализа (т.к. они почти не искажены и, в отличие от данных, полученных по ширине годовых колец, не показывают сильную положительную автокорреляцию). В результате даты обычно получаются путем сравнения необработанных данных по изотопам образца с мастерской хронологией, что в свою очередь довольно существенно уменьшает временные затраты на статистическую обработку данных.

Во-вторых, еще одним следствием очень сильной изотопной корреляции между деревьями является то, что можно получить надежные даты, используя гораздо меньше колец, чем в случае с измерением ширины годовых колец. Исследуя равнинные области Центральной и Южной Англии с умеренным климатом, исследователи пришли к выводу, что многие из образцов можно будет датировать, используя только первые 35 колец.

К сожалению, главным недостатком метода, не позволяющим ему в полной мере заменить собой дендрохронологическое датирование по ширине годовых колец, является его довольно существенная ресурсоемкость (процедуры пробоподготовки образцов, химической обработки и выделения целлюлозы из древесины колец, а также непосредственно самого анализа на ускорительном масс-спектрометре делает данный метод довольно затратным как по времени, так и материально). В целом стоимость проведения данного анализа довольно сопоставима со стоимостью проведения радиоуглеродного анализа. Однако, в отличие от радиоуглеродного датирования, дендрохронология вместе с анализом изотопов кислорода в годовых кольцах может дать точную дату (дату вырубki дерева) с объективно определенной вероятностью ошибки.

Еще одним ограничением данного метода является достаточно сложная (по сравнению с методом измерения ширины годовых колец) процедура отбора образцов древесины, требующая специализированного оборудования (а именно – бура Преслера с диаметром 10–12 мм), или же отбора нескольких кернов с каждого исследуемого дерева. Кроме того, при дальнейшей обработке и пробоподготовке для проведения изотопного анализа фактом, дополнительно осложняющим работу, является погодичное фракционирование проб (при

котором каждый керн нужно разделить по кольцам, чтобы получить независимые друг от друга данные). Тем более далеко не у всех видов деревьев границы колец видны отчетливо, поэтому процесс отбора проб и дальнейшая их датировка может быть существенно затруднена.

Кроме того, не до конца ясными остаются территориальные рамки применения метода. Принимая во внимание тот факт, что для успешной датировки древесины по изотопам кислорода для этого региона уже должна быть построена относительная хронология, на данном этапе пока остается неизвестным, на каком расстоянии от места ее создания изотопный анализ перестанет показывать значимые коэффициенты корреляции (т.к. степень сохранения сигнала у древесных родов на данный момент остается в значительной степени неизученной). Помимо этого, не до конца изученным остается и вопрос того, какие именно факторы окружающей среды будут в большей мере искажать изотопный сигнал, содержащийся в целлюлозе годовых колец.

Несмотря на то, что на данный момент эффективность применения изотопного анализа в дендрохронологии была доказана только для широколиственных лесов умеренно-морской климатической зоны [Loader et al., 2019; 2021], судя по всему, данный метод должен работать и в зоне континентального климата, в т.ч. и на территории Западной Сибири. Это возможно благодаря тому, что ключевым условием для регистрации одинакового изотопного сигнала в древесных кольцах является общий источник воды, питающий деревья, а также их схожая среда обитания.

На основной территории юга Западной Сибири, как и в Великобритании, климатические условия довольно схожи между собой (с возрастанием континентальности по мере удаления от льдов Северного Ледовитого океана вглубь континента). Работа циклонов и высокая облачность на территории равнины наблюдаются редко, а арктические воздушные массы на климат Западной Сибири влияние практически не оказывают (открытость территории с севера и юга дает возможности меридиональным переносам), в результате температурные колебания незначительны. Кроме того, климат большей части Западной Сибири влажный, а большое количество заболоченных лесных массивов, рек и озер дают в летний период охлаждающий эффект всей территории Западно-Сибирской равнины [Архипов, Волкова, 1994, с. 7–15]. Все эти факторы делают условия произрастания деревьев достаточно схожими для того, чтобы химический состав целлюлозы в годовых кольцах продемонстрировал достаточно высокую изотопную когерентность.

Заключение

В целом возможность датировать ранее непригодные для классической дендрохронологии виды деревьев означает довольно существенный прогресс в изучении исторического наследия регионов с умеренным климатом. Кроме того, возможность получить надежные даты, используя гораздо меньше колец, чем в случае с измерением ширины годовичных колец, а также связать и датировать разные породы древесины открывает для научной археологии новые, далеко идущие перспективы. Благодаря данному методу наконец сможет быть датировано огромное число ранее непригодных для датировки деревянных артефактов, накопленных в музейных коллекциях и архивах, которые выполнены из лиственных пород [Дерево..., 2018].

В прошлом дендрохронологи, проводившие оценку потенциала датирования исторического объекта, могли отклонить его как непригодный на основании наличия древесины разных видов, не коррелирующих между собой, или же отсутствия региональной древесно-кольцевой хронологии необходимого вида. Теперь же у нас есть возможность применить еще один, совершенно новый метод дендрохронологии стабильных изотопов, который вполне может решить эти проблемы. В условиях, где невозможно применить хронологию, построенную по ширине годовичного кольца, метод датирования по изотопам кислорода продолжает работать.

Несмотря на то, что данное направление находится еще на довольно ранней стадии исследований, исходя из уже имеющихся данных, можно сделать вывод, что метод датирования при помощи изотопов кислорода демонстрирует значительный потенциал.

Благодарности

М.В. Уткин и М.О. Филатова работали в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2022-0010.

Список литературы

Архинов С.А., Волкова В.С. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири // Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. – 1994. – С. 7–15.

Дерево и мебель. Электронный каталог музейных предметов Государственного исторического музея. – 2018 – URL: https://catalog.shm.ru/entity/OBJECT?fund_id=647756753 (дата обращения: 25.08.2022).

Долгова Е.А. Связь с засушливостью ширины кольца ранней и поздней древесины и оптической плотности колец сосны (на примере Калужской области) // Засухи Восточно-Европейской равнины по гидромете-

орологическим и дендрохронологическим данным. – СПб.: Нестор-История, 2017. – С. 208–222.

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. – Т. 46. – № 4. – С. 109–113.

Шиятов С.Г., Хантемиров Р.М. Дендрохронологическая датировка древесины кустарников из археологического поселения Ярте VI на полуострове Ямал // Древности Ямала. Екатеринбург; Салехард: УрО РАН, 2000. – Вып. 1. – С. 112–122.

Baillie M.G.L. Tree-ring Dating and Archaeology. – Univ. of Chicago Press, 1990.

Baker J.C.A., Hunt S.F.P., Clerici S.J. Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia // Global and Planetary Change. – 2015. – Vol. 133. – P. 298–308.

Barrett M.T., Brown D., Plunkett G. Refining the statistical parameters for constructing tree-ring chronologies using short-lived species: Alder (*Alnus glutinosa* Gaertn) // Dendrochronologia. – 2019. – Vol. 55. – P. 16–24. – doi: 10.1016/j.dendro.2019.03.004

Billamboz A. Dealing with heteroconnections and short tree-ring series at different levels of dating in the dendrochronology of the Southwest German pile-dwellings // Dendrochronologia. – 2008. – Vol. 26. – P. 145–155. – doi: 10.1016/j.dendro.2008.07.001

Bridge M. Can dendrochronology be used to indicate the source of oak within Britain? // Vernacular Architecture. – 2000. – Vol. 31. – P. 67–72.

Bridge M., Tyers C., Bayliss A., Bollhadler S., Wacker L., Loader N.J., McCarroll D., Davies D., Young G., Miles D. Twilly Springs, manor lane, West hended, oxfordshire: tree-ring analysis, radiocarbon wiggle-matching, and oxygen isotope dendrochronology of elm and oak timbers // Historic England Research Report. – 2019. – Series 2019-97.

Dominguez-Delmas M., Alejano-Monge R., Wazny T., Garcia-Gonzalez I. Radial growth variations of black pine along an elevation gradient in the Cazorla Mountains (South of Spain) and their relevance for historical and environmental studies // European J. of Forest Research. – 2013. – Vol. 132. – P. 635–652.

Dunn O.J. Multiple Comparisons among Means // J. of the American Statistical Association. – 1961. – Vol. 56. – P. 52–64.

Haneca K., Cufar K., Beeckman H. Oaks, tree rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe // J. of Archaeol. Sci. – 2009. – Vol. 36. – P. 1–11.

Hillam J., Groves C., Brown M., Baillie M., Coles J., Coles B. Dendrochronology of the English neolithic // Antiquity. – 1990. – Vol. 64. – P. 210–220. – doi: 10.1017/S0003598X00077826

Hollstein E. Mitteleuropäische Eichenchronologie // Trierer Grabungen und Forschungen 11. – 1980. – 273 p.

Larsson L. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 7.6. – 2013. – URL: <http://www.cybis.se/forfun/dendro/> (дата обращения: 01.08.2022 г.).

Loader N. J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B. Tree ring dating using oxygen isotopes: a master chronology for central England // *J. of Quatern. Sci.* – 2019. – Vol. 34. – P. 475–490. – doi: 10.1002/jqs.3115

Loader N. J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B., Williams M., Fudge M. Dating of non-oak species in the United Kingdom historical buildings archive using stable oxygen isotopes // *Dendrochronologia*. – 2021. – Vol. 69. – doi: 10.1016/j.dendro.2021.125862

Loader N.J., Santillo P.M., Woodman-Ralph J.P. Multiple stable isotopes from oak trees in southwestern Scotland and the potential for stable isotope dendroclimatology in maritime climatic regions // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 252. – P. 62–71.

Loader N.J., Switsur V.R. Reconstructing past environmental change using stable isotopes in tree-rings // *Botanical J. of Scotland*. – 1996. – Vol. 48. – P. 65–78.

Roden J. Cross-dating of tree ring delta O-18 and delta C-13 time series // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 252 (1–2). – P. 72–79.

Rydval M., Larsson L.-Å., McGlynn L., Gunnarson B.E., Loader N.J., Young G.H.F., Wilson R. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland // *Dendrochronologia*. – 2014. – Vol. 32. – Iss. 3. – P. 191–204.

Sakamoto M., Hakozaiki M., Nakao N. Fine structure and reproducibility of radiocarbon ages of middle to early modern Japanese tree rings // *Radiocarbon*. – 2017. – Vol. 59. – P. 1907–1917.

Tegel W., Muigg B., Skiadaresis G., Vanmoerkerke J., Seim A. Dendroarchaeology in Europe // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2022. – P. 14–15. – doi: 10.3389/fevo.2022.823622

Wilson R., Miles D., Loader N.J. A millennial long March July precipitation reconstruction for southern central England // *Climate Dynamics*. – 2013. – Vol. 40. – P. 997–1017.

Xu C., Sano M., Nakatsuka T. A 400-year record of hydroclimate variability and local ENSO history in northern Southeast Asia inferred from tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2013. – Vol. 386. – P. 588–598.

Yamada R., Kariya Y., Kimura T. Age determination on a catastrophic rock avalanche using tree-ring oxygen isotope ratios—the scar of a historical gigantic earthquake in the Southern Alps, central Japan // *Quaternary Geochronology*. – 2018. – Vol. 44. – P. 47–54.

References

Arkhipov S.A., Volkova V.S. Geological history, landscapes and climates of the Pleistocene of Western Siberia. *NRC OIGGM SB RAS*, Novosibirsk, 1994. P. 7–15 (In Russ.).

Baillie M.G.L. Tree-ring Dating and Archaeology. *Univ. of Chicago Press*, Chicago, 1990.

Baker J.C.A., Hunt S.F.P., Clerici S.J. Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global and Planetary Change*, 2015. Vol. 133. P. 298–308.

Barrett M.T., Brown D., Plunkett G. Refining the statistical parameters for constructing tree-ring chronologies using short-lived species: Alder (*Alnus glutinosa* Gaertn). *Dendrochronologia*, 2019. Vol. 55. P. 16–24. doi: 10.1016/j.dendro.2019.03.004

Billamboz A. Dealing with heteroconnections and short tree-ring series at different levels of dating in the dendrochronology of the Southwest German pile-dwellings. *Dendrochronologia*, 2008. Vol. 26. P. 145–155. doi: 10.1016/j.dendro.2008.07.001

Bridge M. Can dendrochronology be used to indicate the source of oak within Britain? *Vernacular Architecture*, 2000. Vol. 31. P. 67–72.

Bridge M., Tyers C., Bayliss A., Bollhadler S., Wacker L., Loader N.J., McCarroll D., Davies D., Young G., Miles D. Twilly Springs, manor lane, West hended, oxfordshire: tree-ring analysis, radiocarbon wiggle-matching, and oxygen isotope dendrochronology of elm and oak timbers. *Historic England Research Report*, 2019. Series 2019-97.

Dolgoва E.A. Svyaz' s zasushlivost'yu shiriny kol'tsa ranney i pozdney drevesiny i opticheskoy plotnosti kolets sosny (na primere Kaluzhskoy oblasti). In *Droughts of the East European Plain according to hydrometeorological and dendrochronological data*. St. Petersburg, 2017. P. 208–222. (In Russ.).

Dominguez-Delmas M., Alejano-Monge R., Wazny T., Garcia-Gonzalez I. Radial growth variations of black pine along an elevation gradient in the Cazorla Mountains (South of Spain) and their relevance for historical and environmental studies. *European Journal of Forest Research*, 2013. Vol.132. P. 635–652.

Dunn O.J. Multiple Comparisons among Means. *Journal of the American Statistical Association*, 1961. Vol. 56. Iss. 293. P. 52–64.

Haneca K., Cufar K., Beeckman H. Oaks, tree rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science*, 2009. Vol. 36. P. 1–11.

Hillam J., Groves C., Brown M., Baillie M., Coles J., Coles B. Dendrochronology of the English neolithic.

Antiquity, 1990. Vol. 64. P. 210–220. doi: 10.1017/S0003598X00077826

Hollstein E. Mitteleuropäische Eichenchronologie. *Trierer Grabungen und Forschungen 11*, 1980. 273 p.

Larsson L. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 7.6, 2013. URL: <http://www.cybis.se/forfun/dendro/> (Accessed: 01.08.2022).

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B. Tree ring dating using oxygen isotopes: a master chronology for central England. *Journal of Quaternary Science*, 2019. Vol. 34. P. 475–490. doi: 10.1002/jqs.3115

Loader N.J., McCarroll D., Miles D., Young G.H.F., Davies D., Ramsey C.B., Williams M., Fudge M. Dating of non-oak species in the United Kingdom historical buildings archive using stable oxygen isotopes. *Dendrochronologia*, 2021. Vol. 69. doi: 10.1016/j.dendro.2021.125862

Loader N.J., Santillo P.M., Woodman-Ralph J.P. Multiple stable isotopes from oak trees in southwestern Scotland and the potential for stable isotope dendroclimatology in maritime climatic regions. *Chemical Geology*, 2008. Vol. 252. P. 62–71.

Loader N.J., Switsur V.R. Reconstructing past environmental change using stable isotopes in tree-rings. *Botanical J. of Scotland*, 1996. Vol. 48. P. 65–78.

Myglan V.S., Zharnikov Z.Yu., Sidorova M.O., Barinov V.V., Taynik A.V. Primeneniye metoda blue intensity dlya datirovaniya pamyatnikov derevyannogo zodchestva Sibiri. In *Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia*. Novosibirsk: IAET SB RAS, 2018. N 4. P. 109–113. (In Russ.).

Roden J. Cross-dating of tree ring delta O-18 and delta C-13 time series. *Chemical Geology*, 2008. Vol. 252 (1–2). P. 72–79.

Rydval M., Larsson L.-Å., McGlynn L., Gunnarson B.E., Loader N.J., Young G.H.F., Wilson R. Blue intensity for dendroclimatology: should we have the blues? Experiments from Scotland. *Dendrochronologia*, 2014. Vol. 32. Iss. 3. P. 191–204.

Sakamoto M., Hakozaiki M., Nakao N. Fine structure and reproducibility of radiocarbon ages of middle to early modern Japanese tree rings. *Radiocarbon*, 2017. Vol. 59. P. 1907–1917.

Shiyatov S.G., Khantemirov R.M. Dendrokhronologicheskaya datirovka drevesiny kustarnikov iz arkeologicheskogo poseleniya Yarte VI na poluostrove Yamal. *Drevnosti Yamala*, Yekaterinburg – Salekhard: UrO RAS, 2000. Vol. 1. P. 112–122. (In Russ.).

Tegel W., Muigg B., Skiadaresis G., Vanmoerkerke J., Seim A. Dendroarchaeology in Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022. P. 14–15. doi: 10.3389/fevo.2022.823622

Wilson R., Miles D., Loader N.J. A millennial long March July precipitation reconstruction for southern central England. *Climate Dynamics*, 2013. Vol. 40. P. 997–1017.

Xu C., Sano M., Nakatsuka T. A 400-year record of hydroclimate variability and local ENSO history in northern Southeast Asia inferred from tree-ring $\delta^{18}O$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013. Vol. 386. P. 588–598.

Yamada R., Kariya Y., Kimura T. Age determination on a catastrophic rock avalanche using tree-ring oxygen isotope ratios—the scar of a historical gigantic earthquake in the Southern Alps, central Japan. *Quatern. Geochronology*, 2018. Vol. 44. P. 47–54.

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