

Проблема перекрестного датирования сосны сибирской и лиственницы сибирской на верхней границе леса в Центральном Алтае

В. С. МЫГЛАН, В. В. БАРИНОВ, А. Н. НАЗАРОВ, А. В. ТАЙНИК

Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79
E-mail: v.mygлан@gmail.com

Статья поступила 12.03.2024

После доработки 25.05.2024

Принята к печати 28.05.2024

АННОТАЦИЯ

В рамках дендроклиматических исследований существует необходимость получения высококачественных рядов данных, отражающих состояние природной среды в прошлом. Построение длительных древесно-кольцевых хронологий (по совокупности качеств, являющихся одним из лучших источников палеоклиматической информации) сопряжено с проблемой поиска источника палеодревесины, который позволит продлить ее дальше в прошлое. В представленной работе рассмотрена перспектива продления существующей 2367-летней древесно-кольцевой хронологии по лиственнице сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) за счет привлечения древесины сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour), которая широко представлена в коллекциях, собранных на предполях ледников Алтая. Результаты рассмотрения различных параметров годичных колец наглядно и убедительно продемонстрировали, что на верхней границе леса использование такого параметра, как дельта оптической плотности годичного кольца, позволит надежно перекрестно датировать образцы разных древесных пород и продлить данную древесно-кольцевую хронологию в прошлое.

Ключевые слова: дендрохронология, оптическая плотность годичного кольца, blue intensity (BI), древесно-кольцевая хронология, лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ldb.), сосна сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), Южная Сибирь.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка границ современных изменений климата и природных систем опирается на высококачественные ряды данных, отражающие состояние природной среды в прошлом и основанные на использовании информации из природных архивов. Косвенные индикаторы позволяют получить длительные (тысячелетние и более) временные ряды и оценить долгосрочные тренды климатических изменений. По со-

вокупности качеств одним из лучших индикаторов являются годичные кольца деревьев. Однако длительность древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) различается по территориям и зависит от продолжительности жизни деревьев, которая зачастую не превышает 200–300 лет. По этой причине продление ДКХ является стратегической задачей и достигается путем привлечения древесных остатков, сохранившихся на дневной поверхности в отложениях

различного генезиса, а также в исторических постройках и археологических памятниках.

В ретроспективе одной из первых была построена 8681-летняя хронология по сосне остистой (*Pinus aristata* Engelm.) для западных районов США [Ferguson, Graybill, 1983]. В это же время в Европе были построены три длительные хронологии по скальному (*Quercus petraea* Liebl.) и черешчатому (*Quercus robur* L.) дубам, найденным в речных отложениях и торфяных залежах болот (8246-летняя [Leuschner, Delorme, 1988] и 9924-летняя [Becker, Schmidt, 1990] хронологии для Германии и 7272-летняя – для Ирландии [Pilcher et al., 1984]). Впоследствии хронология для Германии была продлена до 12 460 лет [Friedrich et al., 2004]. Однако с точки зрения возможности привлечения ДКХ для палеоклиматических и экологических реконструкций значимыми являются только те хронологии, годовые кольца которых содержат сильный сигнал, отражающий изменения условий окружающей среды. В настоящее время в мире построено лишь одиннадцать таких ДКХ длительностью более 2 тыс. лет. Семь хронологий построены для территорий за пределами России: 5682 года для Чили [Lara et al., 2020], 3722 года для Тасмании [Cook et al., 2006], 2233 года для Канады [Delwaide et al., 2021], 7400 (по другим данным 7500) лет для Скандинавии [Grudd et al., 2002; Helama et al., 2008], 9111 лет для австрийских Альп [Nicolussi et al., 2009], 2207 лет для Калифорнии [Bunn et al., 2005] и 2004 года для Нью-Мексико [Davi et al., 2015]. На территории России построено четыре хронологии, три из которых расположены в субарктической части: 2427-летняя для п-ова Таймыр [Naurzbaev et al., 2002; Наурзбаев, 2005], 2354-летняя для низовий р. Индигирки [Сидорова, Наурзбаев, 2002] и 8768-летняя для п-ова Ямал [Хантемиров и др., 2021]. Одна 2367-летняя хронология находится в континентальной части России, в Алтае-Саянской горной стране [Мыглан и др., 2012; Büntgen et al., 2016]. Исходя из имеющегося задела, можно сказать, что выполнение работ по продлению длительных ДКХ для территории Сибири является одним из наиболее приоритетных направлений для дендроклиматических и палеоэкологических исследований и имеет мировую научную ценность.

Применительно к континентальной части Южной Сибири выполнение этой задачи для верхней границы произрастания древесной растительности выглядит достаточно проблематично в связи с недостатком палеодревесины. В настоящее время продолжается работа по продлению уже существующей 2367-летней ДКХ Mongun и построению новых хронологий по лиственнице сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) в горах Южной Сибири [Мыглан и др., 2012]. Это уже привело к улучшению качества (наполненности образцами) ДКХ Mongun и продлению до 3223 лет. Однако дальнейшая работа зашла в тупик, так как необходимы источники древесины (остатки лиственницы), которые позволят продлить ДКХ дальше в прошлое. Одно из решений существующей проблемы – привлечение древесины сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour, далее по тексту кедр), которая широко представлена в коллекциях, собранных на предгорьях ледников Алтая. В настоящее время по этой породе уже построено несколько хронологий, приходящихся на разные периоды до нашей эры (н. э.) и имеющих привязку по результатам радиоуглеродного датирования [Назаров, Мыглан, 2012]. Продолжающиеся в этом направлении исследования привели к продлению существующих и появлению новых хронологий по сосне сибирской. Согласно последним данным, некоторые построенные по сосне сибирской хронологии могут пересекаться друг с другом и с 2367-летней ДКХ Mongun по лиственнице сибирской. Однако возникает закономерный вопрос: насколько корректно проводить перекрестное датирование по разным древесным породам на верхней границе леса? В данной работе представлены результаты поиска параметров годового кольца, которые позволят решить данную проблему, а значит, откроют дорогу для существенного прогресса в продлении этой ДКХ в прошлое.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Образцы для сравнительного дендрохронологического анализа отбирались в Центральном Алтае, в пределах средней части Северо-Чуйского хребта, в горно-ледниковом бассейне Актру (рис. 1). Характеристики климата, рельефа, состояние и изменчивость



Рис. 1. Район исследований, участки сбора образцов и положение длительных ДКХ. 1 – место отбора кернов лиственницы сибирской и сосны сибирской на участке Актру; 2 – древесно-кольцевые хронологии по лиственнице сибирской: слева – Jelo [Mygлан et al., 2012], справа – Mongun [Мыглан и др., 2012]

верхней границы леса подробно рассматривались ранее [Галахов и др., 1987; Галахов, Мухаметов, 1999; Назаров, Мыглан, 2013].

Материалом для исследования послужили керны лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) (12 деревьев) и сосны сибирской (*Pinus sibirica*) (16 деревьев). Участок сбора образцов находится на правом берегу р. Актру, в непосредственной видимости фронтального вала ледника Малый Актру (от 50 до 200 м), на абсолютных высотах 2150–2200 м, в зоне совместного произрастания кедра и лиственницы. Керны отбирались по двум радиусам на высоте 120–150 см с деревьев, не имеющих внешних дефектов и чей рост не был дополнительно осложнен внешними факторами (течение грунтов, погребение, наклон ствола, переувлажнение и т. п.).

При измерении параметров годичного кольца использовали современный подход, основанный на методе цифровой анатомии. Смысл которого заключается в получении цифровых изображений годичных колец и последующем измерении по ним таких параметров, как ширина годичного кольца (W), ширина ранней (E) и поздней (L) древесины,

оптическая плотность поздней древесины (BI) и разница (дельта) оптической плотности древесины (ΔBI) [Larsson, 2022]. Использование последнего показателя связано с тем, что в различающихся по источнику происхождения выборках (например, керны с произрастающих деревьев и исторических построек или керны с деревьев разных пород на одном участке) определенной яркости может соответствовать разная оптическая плотность поздней древесины. Для решения этого вопроса исследователями был введен новый параметр – дельта плотности древесины (разница между оптической плотностью ранней и поздней древесины), где яркость в ранней древесине используется как фоновый показатель. Сопоставление значений ΔBI с рентгеновской плотностью (MXD) продемонстрировало, что этот параметр имеет высокую чувствительность к изменчивости климатического сигнала и высокий потенциал для контроля качества перекрестной датировки (более детально изложено в работе [Björklund et al., 2013]).

В нашем случае поверхность образцов после процедуры пробоподготовки (подробная информация приведена на сайте Сибирской

дендрохронологической лаборатории (<https://www.sibdendro.com>)) была сфотографирована в отраженном свете на микроскопе AXIO zoom V16 (CARL ZEISS), оснащенном моторизованным предметным столиком. Полученные фотографии сшивались в программном пакете ZEN (CARL ZEISS), дополнялись сопроводительной информацией об увеличении и масштабе, после чего конвертировались в формат TIFF (Tagged Image File Format) или JPG (Joint Photographic Experts Group). В дальнейшем изображения обрабатывались в программе CooRecorder 9.8.1 (CR), где в ручном режиме измерялась ширина годичного кольца, ширина ранней и поздней древесины. Графическое представление полученных данных выполнялось в программе CDendro 9.8.1. Датирование всех измеренных серий проведено посредством сочетания графической перекрестной датировки и кросс-корреляционного анализа, в ходе которых выявляли выпавшие кольца и ошибки измерений с последующим обращением к цифровым изображениям (проверяли факт наличия или отсутствия годичного кольца, вносили поправки в измерения).

Возрастной тренд измеренных серий по ширине (годичного кольца, ранней – поздней древесины) убирался путем выполнения стандартизации сплайном в две трети от длины каждой серии. Выбор данного способа обусловлен тем, что он позволяет помимо удаления возрастного тренда исключить и “шум”, связанный с локальными условиями произрастания деревьев. Анализировались два варианта полученных хронологий: с автокорреляционной составляющей – индекс STD, и без нее – индекс RES (остаточная). Оптическая плотность для поздней и ранней древесины рассчитывалась двумя способами – pixel и slice, при настройке параметров использовались рекомендации, изложенные в разделе “помощь” (CybisWebHelp) для программы CooRecorder. Для каждого способа (pixel и slice) был рассчитан такой показатель, как дельта оптической плотности. Исходя из рекомендаций автора метода, для расчета интенсивности поглощения поверхностью в синем спектре использовался стандартный параметр в 30 % от светлой/темной древесины. В случае с сосной сибирской при расчете оптической плотности способом pixel в более 5 % случаев значения оптической плотности не определялись

(значение 0). Согласно методическим рекомендациям с помощью денситометра (встроенного в программу) подбиралось более высокое значение. В нашем случае при расчете оптической плотности способом pixel нами взяты значения 40 % (и для сравнения 60) светлой/темной древесины.

Оценка качества построенных хронологий выполнялась на основе применения традиционных показателей: коэффициентов корреляции (множественной и Пирсона), чувствительности, стандартного отклонения, EPS (показывает на каком периоде древесно-кольцевая хронология отражает сигнал генеральной совокупности), RBAR. Приводимые показатели были рассчитаны в программе ARSTAN [Cook, Krusic, 2008]. В качестве основы для сравнения и оценки измеренных параметров нами привлекались длительные ДКХ – Jelo [Myglan et al., 2012] и Mongun [Мыглан и др., 2012], построенные по листовнице сибирской.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате измерения кернов листовницы сибирской (Lar) построены хронологии по ширине годичного кольца, а также ранней и поздней древесины длительностью в 539 лет (с 1477 по 2015 г.). Хронологии Lar оказались пригодными для реконструкции климатических условий ($EPS \geq 0,85$) по ширине годичного кольца и ранней древесины для периода с 1680 по 2015 г., а по ширине поздней древесины – для периода с 1780 по 2015 г. Измерение кернов сосны сибирской (Ked) позволило построить хронологии по ширине годичного кольца, а также ранней и поздней древесины длительностью в 499 лет (с 1519 по 2017 г.). Хронологии Ked пригодны для реконструкции климатических условий ($EPS \geq 0,85$) по ширине годичного кольца и ранней древесины для периода с 1770 по 2015 г. По поздней древесине, к сожалению, отсутствует период, когда $EPS \geq 0,85$. Таким образом, период, когда данные хронологии отражают общий сигнал генеральной совокупности (за исключением хронологии по ширине поздней древесины сосны сибирской), приходится на 1780–2015 гг.

Выполненный расчет коэффициента корреляции (Пирсона) между хронологиями по линейным параметрам (ширине годичного

**Коэффициенты корреляции (Пирсона) между ДКХ по лиственнице сибирской и сосне сибирской
(линейные параметры годичного кольца)**

	Ked_W_STD	Ked_W_RES	Ked_E_STD	Ked_E_RES	Ked_L_STD	Ked_L_RES
Lar_W_STD	0,29	0,23	0,30	0,26	-0,06	-0,13
Lar_W_RES	0,29	0,33	0,31	0,36	-0,12	-0,17
Lar_E_STD	0,30	0,24	0,31	0,27	-0,08	-0,16
Lar_E_RES	0,29	0,33	0,31	0,36	-0,14	-0,20
Lar_L_STD	0,24	0,21	0,25	0,23	0,04	-0,00
Lar_L_RES	0,25	0,30	0,26	0,32	0,01	-0,02
Jelo_W_RES	0,24	0,33	0,26	0,36	-0,14	-0,17
Mongun_W_RES	0,29	0,38	0,30	0,41	-0,08	-0,11

П р и м е ч а н и е. W (wide) – ширина годичного кольца; E (early) – ширина ранней древесины; L (late) – ширина поздней древесины, STD – стандартизированная ДКХ; RES – остаточная ДКХ. Жирным шрифтом выделены значимые величины коэффициентов корреляции. Объем выборки – 235 значений.

кольца, ширине ранней и поздней древесины) показал, что максимальные значения отмечаются при сопоставлении остаточных (RES) хронологий разных древесных пород по таким параметрам, как ширина ранней древесины и ширина годичного кольца (от 0,33 до 0,36, табл. 1). Ширина поздней древесины является наименее пригодным показателем для пере-

крестной датировки разных древесных пород (рис. 2, а). Использование стандартного показателя (ширина годичного кольца STD хронологий) также не позволяет проводить датирование по разным древесным породам. Следует отметить высокие показатели коэффициента корреляции (0,41), полученные при сопоставлении ДКХ по сосне сибирской и ДКХ

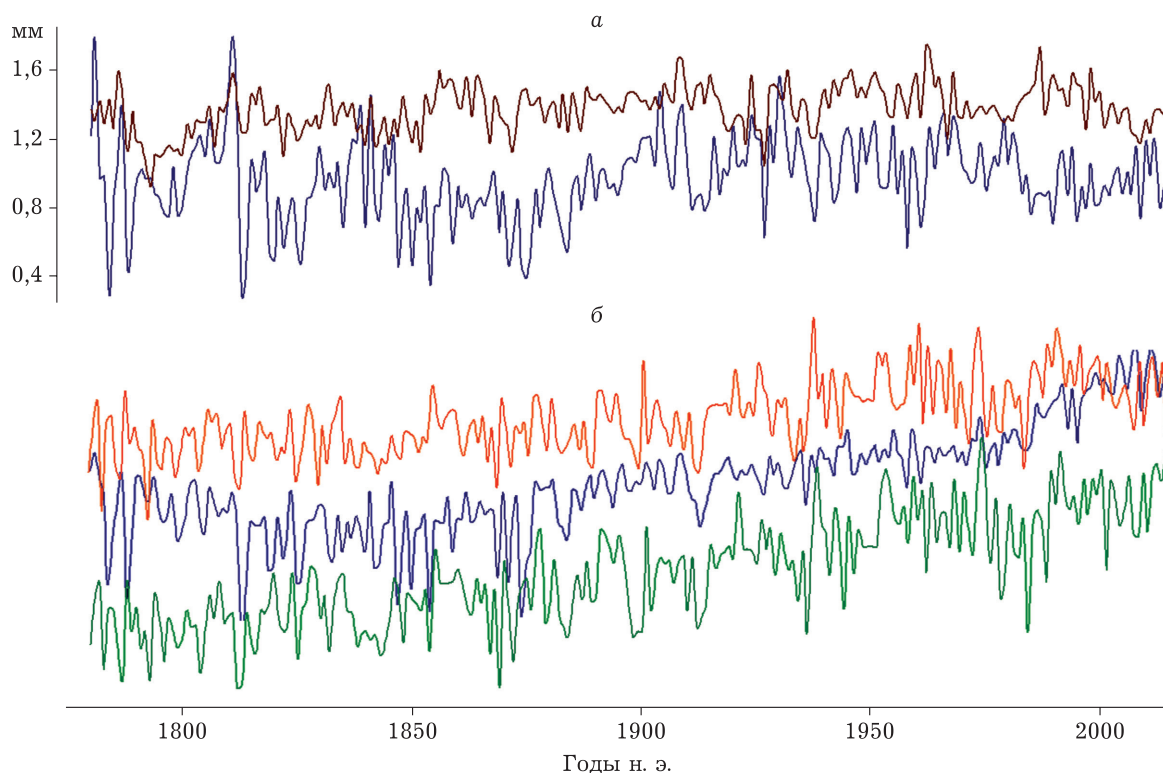


Рис. 2. Взаимный ход изменчивости параметров годичного кольца сосны сибирской и лиственницы сибирской. а – STD-хронологии по ширине годичного кольца. Синий цвет – Lar_W_STD, коричневый – Ked_W_STD (см. табл. 1). б – дельта оптической плотности (здесь и далее см. табл. 2). Синий – Lar Δ pix30, оранжевый – Ked Δ sl40, зеленый – Ked Δ pix40. По вертикальной оси даны относительные безразмерные величины

Mongun (лиственница сибирская) для остаточных хронологий (RES). При этом ДКХ Mongun находится значительно восточнее, чем ДКХ Jelo (см. рис. 1). Резюмируя, можно сказать, что оптимальной стратегией при использовании линейных показателей годичного кольца для перекрестной датировки выглядит привлечение остаточных хронологий по ширине ранней древесины.

Анализ коэффициентов корреляции (Пирсона) показал, что при расчете оптической плотности (интенсивности поглощения поверхностью в синем спектре) лучше использовать рекомендованное значение соотношения светлой/темной древесины, равное 30 %, и способ pixel (табл. 2). Коэффициенты корреляции между оптической плотностью ранней древесины у сосны сибирской и лиственницы сибирской (полученные способом slice и pixel) достаточно высоки и достигают максимального значения 0,68. Максимальные его значения (0,70 и 0,72) отмечаются между дельтой оптической плотности, рассчитанной способом

pixel у сосны сибирской, и дельтой оптической плотности лиственницы сибирской, определенной способом slice и pixel (см. табл. 2, рис. 2, б).

Увеличение показателя светлой/темной древесины до 40 % для сосны сибирской приводит к тому, что максимальные значения коэффициентов корреляции практически не меняются. Как и в предыдущем случае, наблюдаются их высокие значения между оптической плотностью ранней древесины (от 0,60 до 0,67), полученные способом slice и pixel. Такие же высокие значения коэффициентов корреляции (0,69 и 0,72) отмечаются при расчете значений между дельтой оптической плотности способом pixel у сосны сибирской и дельтой оптической плотности у лиственницы сибирской способом slice и pixel (см. табл. 2, рис. 2, б). Дальнейшее увеличение процента светлой/темной древесины с 40 до 60 % у сосны сибирской не приводит к принципиальным изменениям (наблюдается незначительное снижение коэффициентов корреляции).

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты корреляции (Пирсона) между ДКХ по лиственнице сибирской и сосне сибирской для оптической плотности годичного кольца (В1)

	Lar L pix30	Lar L sl30	Lar E pix30	Lar E sl 30	Lar Δ pix30	Lar Δ sl30
Ked L pix30	0,20	0,20	0,38	0,35	-0,25	-0,22
Ked L sl30	0,19	0,19	0,40	0,37	-0,28	-0,25
Ked E pix30	0,01	0,00	0,68	0,66	-0,70	-0,70
Ked E sl30	0,02	0,02	0,62	0,60	-0,63	-0,63
Ked Δ pix30	0,18	0,18	-0,54	-0,54	0,70	0,72
Ked Δ sl30	0,19	0,19	-0,40	-0,41	0,55	0,59
Ked L pix40	0,17	0,17	0,42	0,40	-0,32	-0,29
Ked L sl40	0,18	0,18	0,41	0,38	-0,31	-0,27
Ked E pix40	-0,00	-0,00	0,67	0,65	-0,70	-0,70
Ked E sl40	0,02	0,02	0,62	0,60	-0,63	-0,63
Ked Δ pix40	0,18	0,18	-0,53	-0,53	0,69	0,72
Ked Δ sl40	0,18	0,19	-0,40	-0,42	0,55	0,59
Ked L pix60	0,15	0,15	0,44	0,42	-0,35	-0,33
Ked L sl60	0,16	0,17	0,43	0,40	-0,34	-0,30
Ked E pix60	-0,00	-0,00	0,66	0,64	-0,70	-0,69
Ked E sl60	0,03	0,02	0,63	0,61	-0,64	-0,63
Ked Δ pix60	0,19	0,18	-0,52	-0,53	0,68	0,71
Ked Δ sl60	0,18	0,18	-0,42	-0,43	0,56	0,60

П р и м е ч а н и е. Е – ширина ранней древесины; L – ширина поздней древесины (аналогично табл. 1). STD – стандартизированная ДКХ; RES – стандартизированная ДКХ без автокорреляционной составляющей; 30, 40, 60 – процент светлой/темной древесины, используемой при анализе; sl (slice) и pix (pixel) – способы расчета оптической плотности; Δ – дельта (изменение) оптической плотности древесины. Жирным шрифтом выделены значимые величины коэффициентов корреляции.

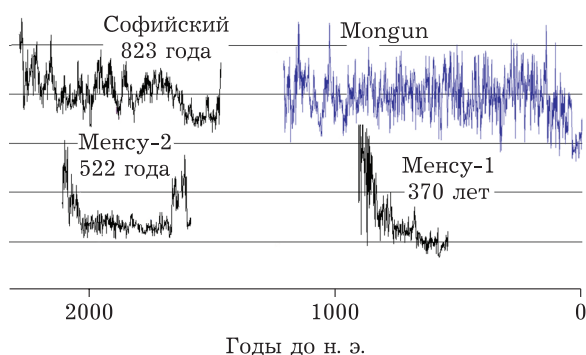


Рис. 3. Плавающие хронологии ископаемой древесины одноименных горно-ледниковых долин Центрального Алтая (*Pinus sibirica*, привязка по данным радиоуглеродного датирования, детально изложено в работе [Назаров, Мыглан, 2012]), имеющие перспективы перекрестного датирования по хронологии Mongun (*Larix sibirica*, абсолютная привязка). Вертикальный масштаб – условный

ОБСУЖДЕНИЕ

Успешные примеры датирования древесно-кольцевых хронологий по разным древесным породам в условиях лимитирования прироста температурами вегетационного сезона известны. Так, например, на северной границе распространения леса проведена уникальная работа по датированию хронологии по ширине годичного кольца, построенной по образцам археологической древесины (ива (*Salix*) и карликовая береза (*Betula nana*)), с длительной ДКХ Ямал (лиственница сибирская) [Шиятов, Хантемиров, 2000]. В ходе дендроархеологических исследований Надымского городка нами были уверенно датированы между собой образцы сосны сибирской, лиственницы сибирской и ели сибирской (*Picea obovata*) [Омурова и др., 2013]. Однако следует отметить, что при продвижении на юг связь между деревьями разных пород ослабевает. Это нашло свое подтверждение при датировании образцов археологической древесины в пос. Березово, где потребовалось построение двух отдельных ДКХ – по сосне сибирской и сосне обыкновенной. Между собой образцы разных пород по ширине годичного кольца не датировались [Мыглан и др., 2023]. Если обратиться к верхней границе леса, то, несмотря на четко выраженный лимитирующий фактор (как и на северной границе), значения коэффициентов корреляции по ширине годичного кольца у разных древесных пород, как пра-

вило, ниже даже на участках, расположенных в непосредственной близости. Возможно, это связано с тем, что на северной границе леса климатические условия в силу выполаженности рельефа более однородны (лесотундра). В горной местности возрастает роль геолого-геоморфологических факторов, которые вносят существенные коррективы в гидро-термический фон, перераспределяя количество тепла и влаги по формам и элементам рельефа [Прокаев, 1983]. Об этом свидетельствуют и результаты нашего исследования. Так, например, несмотря на то, что образцы кедра и лиственницы отбирались из одного местообитания, наиболее высокие коэффициенты корреляции у ДКХ кедра наблюдаются с ДКХ Mongun, удаленной от нее на значительное расстояние (см. табл. 1, рис. 1).

Анализ полученных данных убедительно продемонстрировал, что использование такого параметра, как ширина годичного кольца на верхней границе леса, – не лучший выбор для выполнения перекрестного датирования хронологий по различным древесным породам хвойных. Применение дельты оптической плотности (рассчитанной способом pixel) позволяет надежно перекрестно датировать уже построенные древесно-кольцевые хронологии (например, Mongun и Менсу, рис. 3). Появляется возможность для существенного прогресса в деле продления существующей ДКХ Mongun, а значит, и углубления наших представлений о происходивших в прошлом климатических изменениях в Алтае-Саянском регионе.

ВЫВОДЫ

Анализ полученных данных наглядно и убедительно продемонстрировал, что на верхней границе леса использование такого параметра, как ширина годичного кольца, – не лучший выбор для выполнения перекрестного датирования хронологий, построенных по разным древесным породам. Анализ шести параметров годичного кольца показал, что использование дельты оптической плотности, рассчитанной способом pixel, позволяет проводить подобное датирование, а значит, открывает дорогу для существенного прогресса в продлении имеющихся палеоклиматических и экологических реконструкций для Алтае-Саянского региона. Построение комби-

нированной древесно-кольцевой хронологии по двум лесобразующим породам Центрального Алтая, несомненно, имеет теоретическое и прикладное значение, поскольку она может быть привлечена для датирования палеоботанической (ископаемой) древесины, событий перестройки рельефа различного генезиса, в том числе экстремальных событий, а также для построения климатических реконструкций и верификации данных, полученных по другим природным архивам.

Вклад авторов

Мыглан В. С. – формирование идеи, формулировка или развитие ключевых целей и задач, измерение, обработка и построение хронологий, написание черновика статьи; Тайник А. В., Баринов В. В. – проведение исследований, в частности, проведение экспериментов или сбор данных/доказательств, анализ и интерпретация полученных данных; Назаров В. В. – анализ черновика рукописи, его критическая оценка с внесением ценных замечаний интеллектуального содержания, участие в научном дизайне, подготовка, создание и/или презентация опубликованной работы.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, № 23-74-01019, <https://rscf.ru/project/23-74-01019/>

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

Галахов В. П., Мухаметов Р. М. Ледники Алтая. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. 136 с.
Галахов В. П., Нарожный Ю. К., Никитин С. А. Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеиздат, 1987. 118 с.
Мыглан В. С., Визгалов Г. П., Жарников З. Ю., Баринов В. В., Петрова Е. Н., Тайник А. В., Филатова М. О. Новые страницы истории Березово: дендрохронологическое исследование // Вестн. НГУ. Серия: История, филология. 2023. Т. 22. № 7: Археология и этнография. С. 91–117.
Мыглан В. С., Ойдупаа О. Ч., Ваганов Е. А. Построение 2367-летней древесно-кольцевой хронологии для Алтае-Саянского региона (горный массив Монгун-Тайга) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2012. Т. 3, № 51. С. 84–94. [Myglan V. S., Oidupaа O. Ch., Vaganov E. A. A 2367-Year Tree-Ring Chronology for the Altai–Sayan Region (Mongun-Taiga Mountain Massif) // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2012. Vol. 40, Issue 3. P. 76–83].

Назаров А. Н., Мыглан В. С. Перспективы построения 6000-летней хронологии по сосне сибирской для территории Центрального Алтая // Журн. Сиб. фед. ун-та. Серия: биол. науки. 2012. № 1. С. 70–88.
Назаров А. Н., Мыглан В. С. Применение кедра сибирского с целью реконструкции климата и геоморфологических событий на Алтае // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 2. С. 43–51.
Наурызбаев М. М. Дендроклиматический анализ длительных изменений температурного режима в Субарктике Евразии: дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2005. 257 с.
Омурова Г. Т., Баринов В. В., Кардаш О. В., Мыглан В. С. Установление времени строительства (перестройки) Надымского городка: дендрохронологический аспект // Журн. СФУ. Серия: Биология. 2013. Т. 6, № 2. С. 185–195.
Прокаев В. И. Физико-географическое районирование: учеб. пособие для студентов пед. ин-тов. М.: Просвещение, 1983. 176 с.
Сидорова О. В., Наурызбаев М. М. Реакция на климатические изменения лиственницы Каяндера на верхней границе леса и в долине реки Индигирки // Лесоведение. 2002. № 2. С. 73–75.
Хантемиров Р. М., Шиятов С. Г., Горланова Л. А., Кукарских В. В., Сурков Ю. А., Хамзин И. Р., Вакер Л. 8768-летняя Ямальская древесно-кольцевая хронология как инструмент для палеоэкологических реконструкций // Экология. 2021. Т. 5, № 5. С. 388–397. [Hantemirov R. M., Shiyatov S. G., Gorlanova L. A., Kukarskih V. V., Surkov Ya. A., Hamzin I. R., Wacker L. An 8768-year Yamal Tree-ring Chronology as a Tool for Paleocological Reconstructions // Russian Journal of Ecology. 2021. Vol. 52, Issue 5. P. 419–427.]
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.
Becker B., Schmidt B. Extension of the European oak chronology to the past 9924 years / Eds: H. T. Waterbolk, W. G. Mook // Proc. of the Second Int. Symp., Archaeology and ¹⁴C. 1990. PACT 29. P. 37–50.
Björklund J. A., Gunnarson B. E., Seftigen K., Esper J., Linderholm H. W. Is blue resin intensity ready to replace maximum latewood density as a strong temperature proxy? A tree-ring case study on Scots pine from northern Sweden // Clim. Past Discuss. 2013. N 9. P. 5227–5261.
Bunn A. G., Graumlich L. J., Urban D. L. Interpreting the climatic significance of trends in twentieth-century tree growth at high elevations // The Holocene. 2005. Vol. 15 (4). P. 481–488.
Büntgen U., Myglan V. S., Ljungqvist F. C., McCormick M., Cosmo N. Di, Sigl M., Jungclaus J., Wagner S., Krusic P. J., Esper J., Kaplan J. O., de Vaan M. A. C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirdyanov A. V. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD // Nat. Geosci. 2016. Vol. 9. Issue 3. P. 231–U163.
Cook E. R., Buckley B. M., Palmer J. G., Fenwick P., Peterson M. J., Boswijk G., Fowler A. Millennia-long tree-ring records from Tasmania and New Zealand: a basis for modelling climate variability and forcing, past, present and future // J. Quat. Sci. 2006. Vol. 21. P. 689–699.

- Cook E. R., Krusic P. J. A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics (ARSTAN). 2008. URL: <http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/trl/public/publicSoftware.html> (дата обращения: 01.02.2024).
- Davi N. K., D'Arrigo R., Jacoby G. C., Cook E. R., Anchukaitis K. J., Nachin B., Rao M. P., Leland C. A long-term context (931–2005 CE) for rapid warming over Central Asia // *Quat. Sci. Rev.* 2015. Vol. 121. P. 89–97.
- Delwaide A., Asselin H., Arseneault D., Lavoie C., Payette S. A 2233-year tree-ring chronology of subarctic black spruce (*Picea mariana*): growth forms response to long-term climate change // *Écoscience*. 2021. Vol. 28. Issue 3–4. P. 399–419.
- Ferguson C. W., Graybill D. A. Laboratory of Tree-Ring Research University of Arizona // *Radiocarbon*. 1983. Vol. 25, N 2. P. 287–288.
- Friedrich M., Remmele S., Kromer B., Hofmann J., Spurk M., Kaiser K. F., Orzel Ch., Kuppers M. The 12,460-Year Hohenheim Oak and Pine Tree-Ring Chronology from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions // *Radiocarbon*. 2004. Vol. 46, N 3. P. 1111–1122.
- Grudd H., Briffa K. R., Karlén W., Bartholin T. S., Jones P. D., Kromer B. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales // *Holocene*. 2002. Vol. 12. P. 643–656.
- Helama S., Mielikainen K., Timonen M., Eronen M. Finnish supra-long tree-ring chronology extended to 5634 BC // *Norwegian J. Geogr.* 2008. Vol. 62. P. 271–277.
- Lara A., Villalba R., Urrutia-Jalabert R., González-Reyes A., Aravena J. C., Luckman B. H., Cuq E., Rodríguez C., Wolodarsky-Franke A. +A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America // *Quat. Sci. Rev.* 2020. Vol. 228, N 106087.
- Larsson L. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder // Cdendro package version 9.8.1. 2022. URL: <https://www.cybis.se/forfun/dendro/helpcoorecorder7/index.htm> (дата обращения: 01.02.2024). Текст: электронный.
- Leuschner H. H., Delorme A. Tree-ring work in Göttingen: absolute oak chronologies back to 6255 BC / Eds.: T. Hackens, A. V. Munaur, C. Tills, itors // *Wood and Archaeol.* 1988. Part 22. P. 123–132.
- Myglan V. S., Zharnikova O. A., Malysheva N. V., Gerasimova O. V., Vaganov E. A., Sidorova O. V. Constructing the tree-ring chronology and reconstructing summer-time air temperatures in southern Altai for the last 1500 years // *Geogr. Nat. Res.* 2012. Vol. 33. P. 200–207.
- Naurzbaev M. M., Vaganov E. A., Sidorova O. V., Schweingruber F. H. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2,427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series // *Holocene*. 2002. Vol. 12. P. 727–736.
- Nicolussi K., Kaufmann M., Melvin T. M., van der Plicht J., Schießling P., Thurner A. A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations // *The Holocene*. 2009. Vol. 19 (6). P. 909–920.
- Pilcher J. R., Baillie M. G. L., Schmidt B., Becker B. A 7272-year tree-ring chronology for western Europe // *Nature*. 1984. N 312. P. 150–152.

The problem of cross-dating of Siberian pine and Siberian larch on the upper forest boundary in the Altai-Sayan ecoregion

V. S. MYGLAN, V. V. BARINOV, A. N. NAZAROV, A. V. TAINIK

Siberian Federal University
79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia
E-mail: v.myglan@gmail.com

In dendroclimatic studies, there is a need for high-quality data series reflecting the state of the environment in the past. The construction of long-term tree-ring width (TRW) chronologies (in terms of the combined qualities of being one of the best sources of paleo-climatic information) is associated with the problem of finding a source of paleo wood, which will allow it to extend further into the past. The paper considers the prospect of extending the existing 2367-year TRW chronology (on the Siberian larch) due to the attraction of wood of Siberian pine, which is widely presented in collections collected on the premises of the Altai glaciers. The results of consideration of various parameters of annual rings, clearly and convincingly demonstrated that at the upper edge of the forest, the use of such parameter, as the delta of optical density of the annual ring will allow reliably to cross-date samples of different tree species and extend this TRW chronology to the past.

Key words: dendrochronology, blue intensity (BI), tree-ring chronology, Siberian larch (*Larix sibirica* Ldb.), Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour), Southern Siberia.