

УДК 581.51+57.087.1

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕКРЕСТНОЙ ДАТИРОВКИ ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЙ ПРИ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В. А. Осколков, Р. С. Мориц, В. И. Воронин, Н. Н. Мичурин

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132*

E-mail: vosk@sifibr.irk.ru, mordendro@gmail.com, bioin@sifibr.irk.ru, NikitaDranik@Hotmail.com

Поступила в редакцию 03.09.2024 г.

Рассматривается подход к регламентации и автоматизации перекрестной датировки ширины годичных колец – неотъемлемого этапа при получении древесно-кольцевых хронологий. Он применяется повсеместно и может проводиться с использованием программных инструментов, но по-прежнему не регламентирован полностью и зависит от субъективных факторов. Классический подход перекрестной датировки основан на выборе одной или нескольких индивидуальных древесно-кольцевых хронологий (ИДКХ) в качестве референсных и поочередной датировке остальных хронологий относительно выбранных и имеет ряд ограничений. Представленный нами подход фактически повторяет его, но с той лишь разницей, что основной уклон сделан в сторону автоматизации процесса. При этом все ИДКХ могут выступать в роли референсных и датироваться между собой, объединяясь в отдельные выборки по уровню корреляции. Таким образом, по завершении процесса мы будем иметь множество выборок хорошо датированных ИДКХ, при том, что сами выборки, скорее всего, будут плохо коррелировать друг с другом. В исходной выборке останутся не коррелирующие между собой ИДКХ. Метод автоматизации перекрестной датировки был применен при создании обобщенных древесно-кольцевых хронологий *Muy 1510-2015AD*; *Muy 1 107BC-2015AD* и *Muy 2 3919-2053BC* (Муйско-Куандинская котловина, Бурятия) и позволил значительно повысить статистические показатели и качество обобщенных древесно-кольцевых хронологий.

Ключевые слова: *древесно-кольцевые хронологии, перекрестная датировка, регламентация, автоматизация, верификация.*

DOI: 10.15372/SJFS20250104

ВВЕДЕНИЕ

Перекрестная датировка – неотъемлемый этап при получении древесно-кольцевых хронологий, осуществляемый с поддержкой широкого спектра программных средств, упрощающих сам процесс перекрестной датировки (Rinn, 2003; Bunn, 2010), и позволяющих контролировать качество конечного результата (Grissino-Mayer, 2001). Зачастую перекрестная датировка затруднена слабым сигналом в индивидуальных древесно-кольцевых хронологиях (ИДКХ), пороками древесины, выпадением колец, наличием ложных колец, плохой сохранностью образцов (Li, 2022; Helama, 2023; Carroll, Sillett, 2023). Проблема слабого сигнала в настоящее время

частично решается применением альтернативных каналов информации, таких как посерийное фотодокументирование в высоком разрешении годичных колец с последующей перекрестной датировкой (Кузнецова и др., 2014) и изучение интенсивности синего спектра в этих изображениях (Rydval et al., 2014). Данный подход позволяет получить достаточно выраженный сигнал в тех случаях, когда ширина годичного кольца не отражает в должной мере сигнала условий среды. Однако он тоже имеет ряд ограничений.

Измерение ширины годичного кольца возможно даже в случае чрезвычайно сложных образцов (с плохой сохранностью либо с высоким содержанием пороков древесины) и позволяет в ручном режиме принимать решение о страте-

гии измерения и идентификации свидетельств внешнего воздействия (морозобойные кольца, пожарные подсушины и т. д.). Таким образом, использование ширины годичного кольца по-прежнему актуально, но перекрестная датировка материала может сопровождаться определенными сложностями.

Процесс перекрестной датировки ширины годичных колец хотя и применяется повсеместно и может проводиться с использованием программных инструментов, по-прежнему не регламентирован полностью и зависит от субъективных факторов (Levy et al., 2021). В то же время этот методический прием достаточно универсален и применим не только в анализе древесно-кольцевых хронологий, но и при изучении иных природных регистрирующих структур (Riechelmann et al., 2019; Römer et al., 2023; и др.). Это свидетельствует о том, что развитие методологического и инструментального арсенала исследователей в данной области продолжает сохранять актуальность (Румянцев и др., 2010; Maxwell et al., 2011).

Настоящая работа посвящена созданию универсального алгоритма перекрестной датировки древесно-кольцевых серий с целью регламентации и автоматизации (посредством реализации алгоритма в качестве компьютерной программы) данного процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ширину годичных колец измеряли под бинокулярным микроскопом MSP-2 (LOMO) при увеличении $\times 40$ на полуавтоматической компьютерной установке LINTAB с шагом в 10 мкм. Затем строили индивидуальные древесно-кольцевые хронологии. Посредством сочетания кросс-корреляционного анализа (Holmes, 1998) и графической перекрестной датировки (Douglass, 1919) определяли относительную (плавающую) или абсолютную (календарную) дату индивидуальных древесно-кольцевых хронологий. Кросс-корреляционный анализ реализовали в специализированном пакете программ для дендрохронологических исследований DPL-1994 (Holmes, 1998), графическую перекрестную датировку – в программном пакете TSAP-win (Rinn, 2003) с визуальным сопоставлением кривых изменчивости абсолютных значений радиального прироста. Возрастной тренд оценивали для каждого индивидуального дерева, возрастную кривую аппроксимировали негативной экспонентой, отно-

сительно которой рассчитывали индексы прироста. Затем ряды индексов усредняли для совокупности деревьев одного сайта (для живых деревьев) или временного периода (для полуископаемой древесины) и в итоге получалась стандартная обобщенная хронология (Methods..., 1990). Удаление возрастного тренда и построение хронологии проводили в пакете dplR для среды R (R Core Team, 2000–2024; Bunn, 2008). Контроль качества датировки выполняли в программе Cofecha (Holmes, 1998). Для параллельных вычислений использовали пакеты doParallel и foreach для среды R (Weston, Calaway, 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Классический подход перекрестной датировки основан на выборе одной или нескольких индивидуальных древесно-кольцевых хронологий (ИДКХ) в качестве референсных и поочередной датировке остальных серий относительно выбранных (Rinn, 2003). Датированные ИДКХ объединяются в промежуточные обобщенные древесно-кольцевые хронологии (ОДКХ) и уже выступают в качестве референсных хронологий. Так продолжается до тех пор, пока все ИДКХ не будут перекрестно датированы. Далее следует проверка качества датировки с применением таких параметров, как средняя корреляция между сериями (RBAR), EPS, синхронность между всеми возможными сериями (GLK), межсерийная корреляция каждой ИДКХ с ОДКХ. Если отдельные ИДКХ не отражают общий сигнал в достаточной мере, они могут быть удалены.

Такой подход имеет ряд ограничений. Во-первых, сложно определиться с референсными хронологиями. Критерии, по которым они выбираются, бывают субъективными и весьма расплывчатыми. В них могут содержаться ошибки (ложное кольцо, выпавшее кольцо – особенно в полуископаемой древесине), что усложняет процесс датировки, вызывая ряд проблем и неопределенностей. Во-вторых, если по тем или иным причинам выборка содержит разные подгруппы (разные древесные породы, образцы из различных местообитаний), классический процесс перекрестной датировки может быть усложнен, а подвыборки могут быть выявлены уже на этапе кластеризации перекрестно-датированного материала. В-третьих, перекрестная датировка больших разнородных выборок – это субъективный «творческий» процесс, который несколько усложняет повторяемость и верифи-

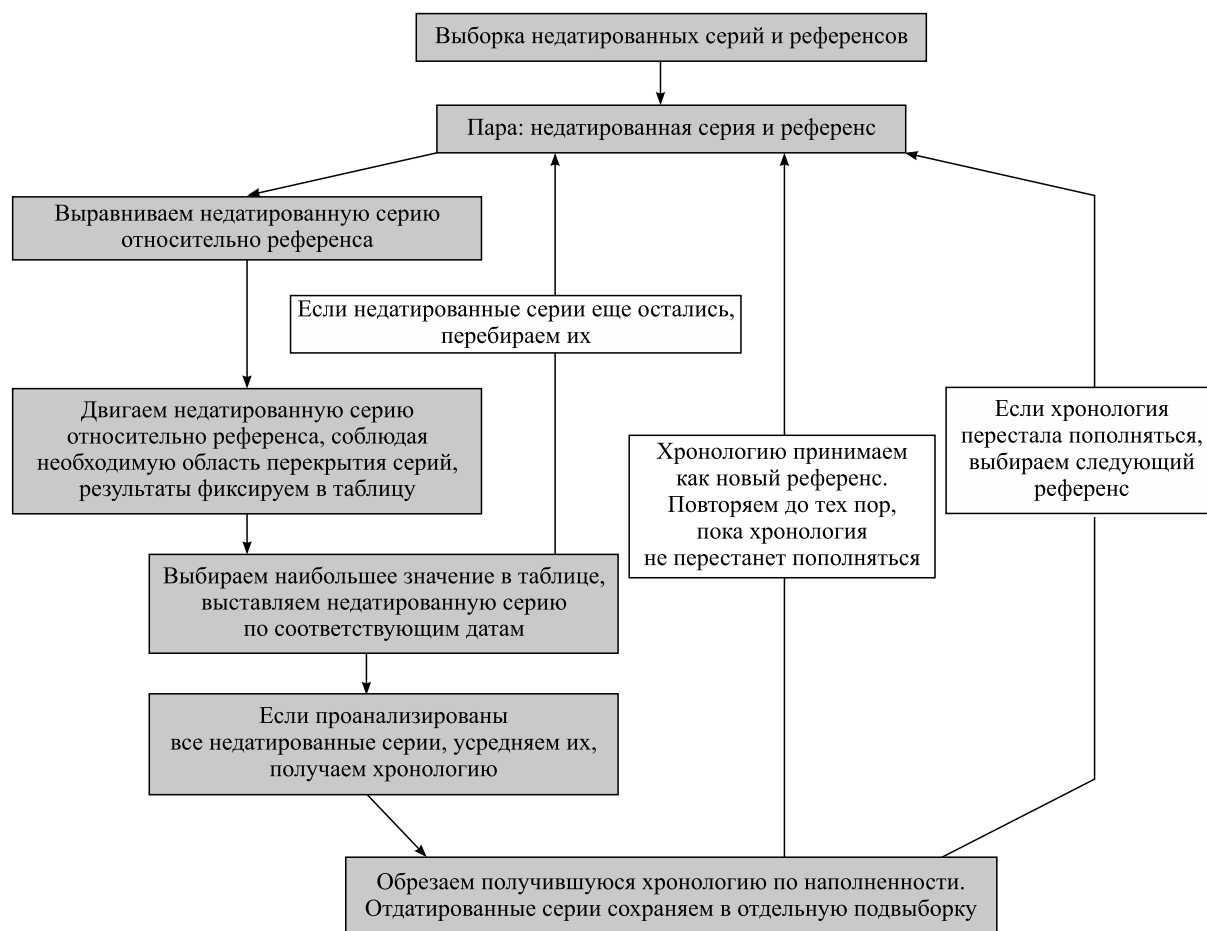


Рис. 1. Перекрестная датировка с имеющимися референсами, абсолютно или относительно (радиоуглерод) датированными и недатированными сериями (ИДКХ с неустановленной датировкой (Rinn, 2003)).

цируемость конечной работы, а также затрудняет планирование до начала работы.

Наш подход фактически повторяет классическую методику перекрестной датировки, но с той лишь разницей, что основной уклон сделан в сторону автоматизации процесса. Большая часть проблем классического метода, даже с учетом применения специального программного обеспечения, подразумевает множество повторяющихся операций. При наличии абсолютно или относительно датированных референсов пригоден следующий подход (рис. 1).

Каждая ИДКХ перекрестно датируется со всеми референсами и относится к соответствующей группе. Датированными считаются только те ИДКХ, которые имеют лучшие результаты датировки и соответствуют минимальным критериям, заданным пользователем заранее. Совокупность плавающих ОДКХ, полученных из групп относительно датированных ИДКХ, перекрестно датируются между собой. Не вошедшие в анализ ИДКХ требуют дополнительного перекрестного датирования.

На первом этапе создается первичная хронология. Для этого каждая ИДКХ в выборке становится референсом, относительно которого датируются все остальные хронологии (рис. 2).

В дальнейшем наиболее наполненная первичная выборка удаляется из общей выборки и усредняется в ОДКХ. Относительно ее датируются остальные ИДКХ, и те, которые соответствуют критериям надежной датировки, также вносятся в первичную выборку и удаляются из основной выборки. Процесс повторяется до тех пор, пока относительно первичной хронологии не перестанут датироваться ИДКХ из основной выборки. Как только это происходит, все оставшиеся ИДКХ вновь принимаются как референсы, и процесс повторяется в более широком масштабе, но датированные хронологии записываются уже в отдельную выборку. Таким образом, по завершении процесса мы имеем ряд выборок надежно перекрестно датированных ИДКХ, при том, что сами выборки могут плохо коррелировать друг с другом. В исходной выборке остаются не коррелирующие между собой ИДКХ.

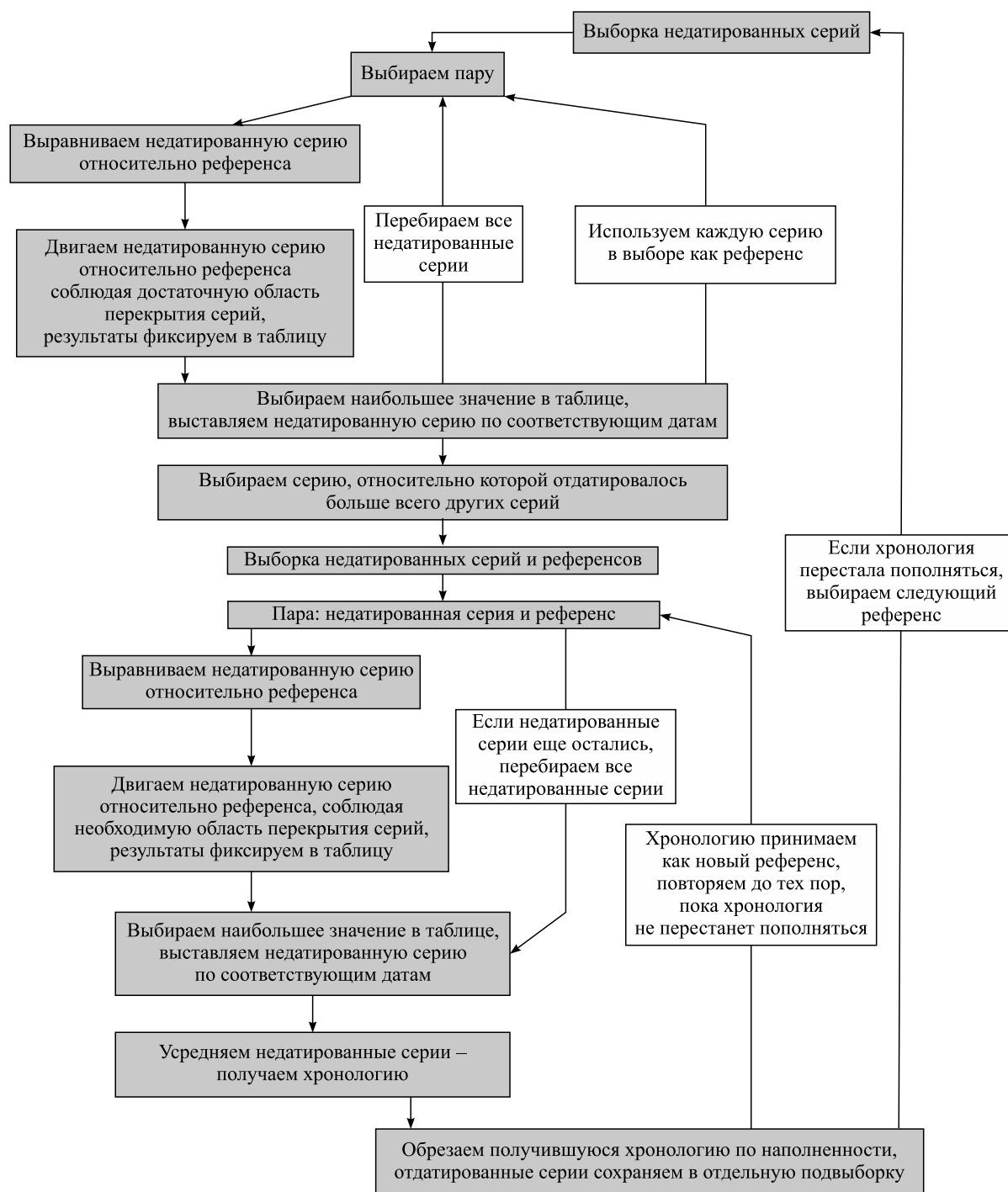


Рис. 2. Перекрестная датировка без референсов.

Данный подход тестировался с использованием комбинации ИДКХ из различных местобитаний и относящихся к различным породам, в результате чего они были четко разделены на отдельные подвыборки.

Сам процесс можно разделить на два чередующихся этапа: выбор референса и рост подвыборки. Первый этап достаточно просто реализуется с применением параллельных вычислений, что существенно ускоряет его реализацию,

однако второй этап подразумевает последовательное использование результатов предыдущей итерации с последующей. Выполнение вычислений занимает здесь достаточно много времени, при этом длительность процесса слабо прогнозируема.

Анализ корреляционных связей внутри готовых выборок может выявить отдельные ИДКХ, которые ослабляют общий сигнал. Такие хронологии следует поочередно удалять, повторяя

анализ связей внутри выборки. Наиболее простым решением является оценка корреляции каждой ИДКХ с ОДКХ, удаление наименее коррелирующей ИДКХ, перестройка ОДКХ и повторение процесса.

Таким образом, нам удалось автоматизировать процесс перекрестной датировки сложных выборок, особенно ИДКХ с заведомо неизвестными датами, так называемых «плавающих хронологий». Верификация метода «автоматизации перекрестной датировки» была проведена при создании ОДКХ Муу 1510-2015AD; Муу 1 107BC-2015AD и Муу 2 3919-2053BC.

В Муйско-Куандинской котловине в Бурятии имеется обилие хорошо сохранившейся полуюскопаемой древесины голоценового возраста, как на дневной поверхности, так и в аллювиальных береговых песчаных отложениях, высота которых в ряде мест достигает 30 м и более. Нами получены образцы древесины живых деревьев в пределах Муйско-Куандинской котловины с островов, образованных древесными завалами и песчаными наносами, а также погребенной (полуископаемой) древесины, обнажившейся в результате размыва песчаных берегов Муи. Часть образцов, имеющая большой биологический возраст и глубокое залегание в береговых обнажениях, отдана для радиоизотопного датирования, которое проводилось в Геологическом институте РАН (Москва), Eidgenossische Technische Hochschule (Zurich, Switzerland), Beta

analytic inc. (Miami, Florida, USA) и Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск). Были получены 32 радиоизотопные даты. При этом оказалось, что пять образцов относится к современному периоду, а остальные с учетом дублей распределились во временном диапазоне от 100–400 AD до 43000 BP. Из-за сложности и неоднозначности в возрастных характеристиках некоторых образцов и физической невозможностью датировать большинство из них с помощью радиоизотопного метода возникла необходимость помимо классической перекрестной датировки ИДКХ образцов применить разработанную нами и приведенную выше методику автоматической перекрестной датировки. В частности, для хронологии Муу сравнительный анализ показал, что при этом были значительно повышены статистические параметры и качество хронологий, при том, что количество использованных образцов практически осталось неизменным (79 при автоматической датировке, 78 при классической). Это позволило нам верифицировать «автоматический метод перекрестной датировки» (рис. 3, табл. 1).

С использованием метода автоматизации перекрестной датировки нами также были созданы многовековая непрерывная ОДКХ по лиственнице для Муйско-Куандинской котловины, охватывающая более 1500 лет периода позднего голоцена, и ряд плавающих хронологий, характеризующий рост лиственницы на протяжении

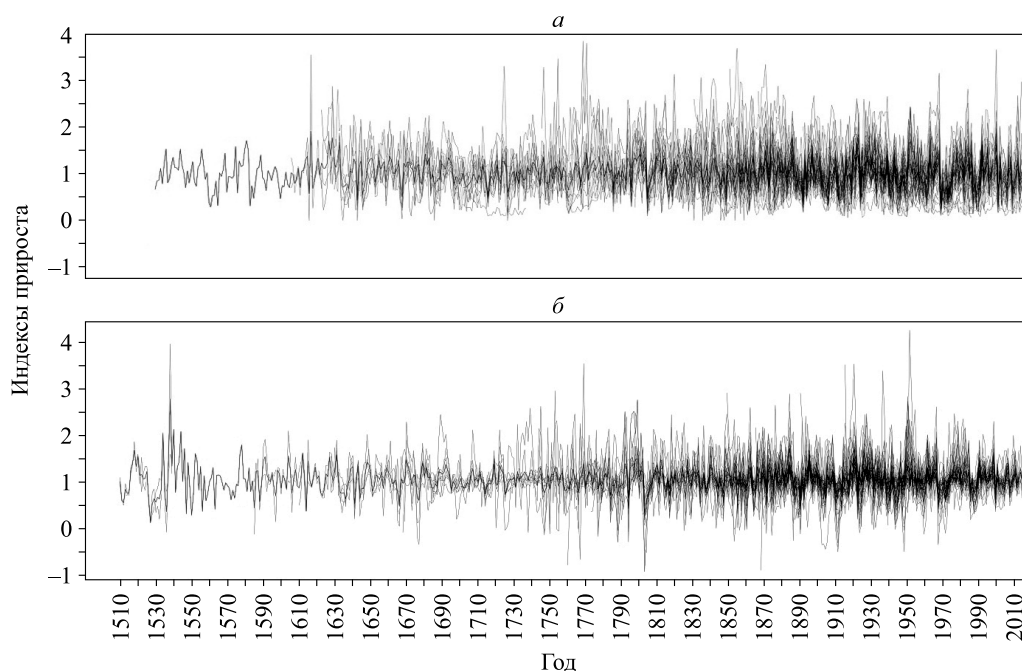


Рис. 3. Индивидуальные ДКХ лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.). Перекрестная датировка: а – классическая (ручная), б – автоматизированная.

Таблица 1. Сравнение статистических показателей двух хронологий Муу, сделанных классическим методом перекрестной датировки (Муу mas 1) и автоматизированным способом (Муу mas 2)

Хронология	Год		Протяженность, лет	n	RBAR	EPS	SNR	GLK	Межсерийная корреляция	
	первый	последний							min	max
Муу mas 1	1528	2015	488	78	0.242	0.941	24.878	0.61	0.26	0.60
Муу mas 2	1510	2015	506	79	0.297	0.971	33.346	0.63	0.33	0.69

Таблица 2. Статистические показатели хронологий Муу 1 и Муу 2, полученных автоматизированным способом

Хронология	Год		Протяженность, лет	n	RBAR	EPS	SNR	GLK	Межсерийная корреляция	
	первый	последний							min	max
Муу 1	-107	2015	2123	185	0.24	0.97	24.878	0.56	0.26	0.67
Муу 2	3919BC	2053BC	1866	79	0.297	0.971	33.346	0.54	0.33	0.69

всего периода голоцена и позднего плейстоцена (Воронин и др., 2017).

В ходе дальнейшей работы новый материал позволил построить две непрерывные двухтысячелетние древесно-кольцевые хронологии (Муу 1 107BC-2015AD и Муу 2 3919-2053BC), по которым можно восстановить и проанализи-

ровать изменчивость климата значительной части голоцена в Северном Забайкалье (табл. 2).

На рис. 4 показаны ИДКХ лиственницы, вошедшие в абсолютно датированную обобщенную древесно-кольцевую хронологию Муу 1, а на рис. 5 – стандартизированные ОДКХ, вошедшие в хронологию Муу 2.

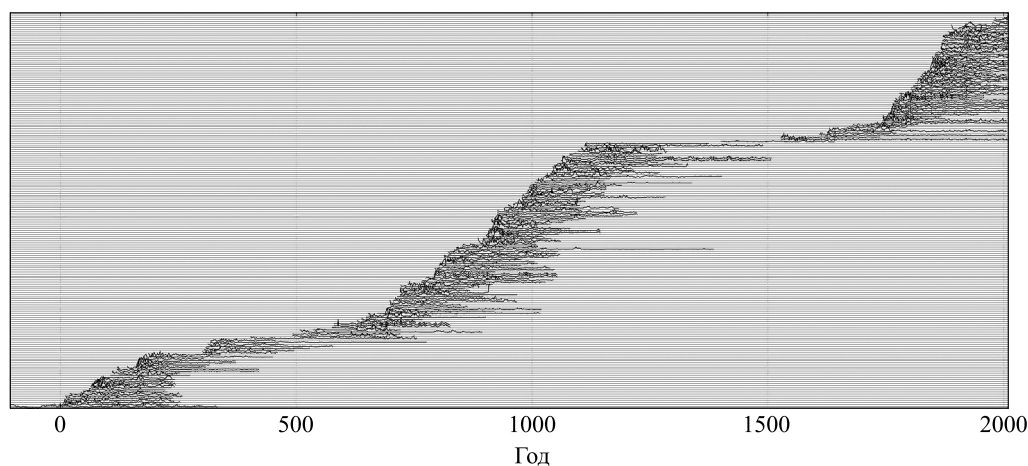


Рис. 4. ИДКХ лиственницы, положенные в основу ОДКХ Муу 1.

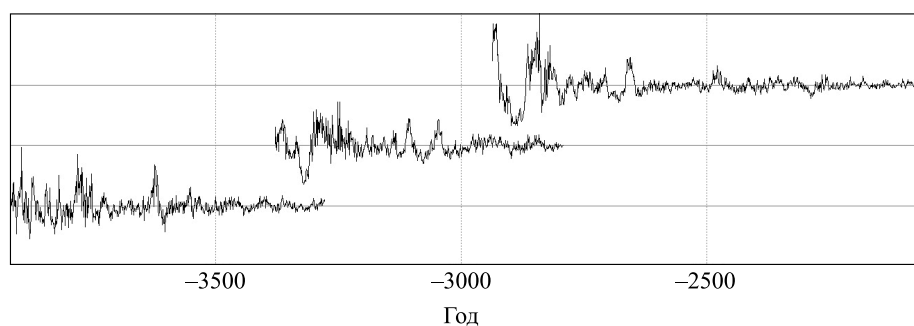


Рис. 5. Стандартизированные ОДКХ временного периода 3919 ÷ 2053 BC, вошедшие в хронологию Муу 2.

У остальных плавающих обобщенных хронологий, основанных на использовании ИДКХ с полученными ранее радиоизотопными датировками и не вошедших в ОДКХ $\text{Mu}_y 1$ и $\text{Mu}_y 2$, методом автоматизации перекрестной датировки также удалось значительно повысить уровень их статистических показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами был регламентирован и автоматизирован процесс перекрестной датировки древесно-кольцевых хронологий, что позволило минимизировать субъективный подход и сократить временные затраты при дендрохронологических исследованиях. Методом автоматизации перекрестной датировки также удалось значительно повысить статистические показатели и качество обобщенных древесно-кольцевых хронологий.

Разработанный нами алгоритм реализован в программной среде R, однако его простота позволяет реализовать его в любых подходящих программных средствах. В перспективе данный алгоритм будет реализован в виде отдельного пакета для среды R и доступен широкому кругу исследователей.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН № 122041100058-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронин В. И., Осколков В. А., Буянтуев В. А., Мориц Р. С., Швецов С. Г. Многовековая цикличность динамики природных условий, зафиксированная в сверхдлинной древесно-кольцевой хронологии «Муя» // Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры. 2017. № 6. С. 72–78.

Кузнецова Е., Николаев Д., Григорьев А. Разработка методов выделения годичных колец на фотографиях поперечных спилов деревьев и построения перекрестных датировок по серии изображений // Информационные технологии и системы: 38 конференц.-школа ИППИ РАН, 1–5 сент. 2014, Нижний Новгород, Россия. Нижний Новгород, 2014. С. 218–228.

Румянцев Д. Е., Соломина О. Н., Липаткин В. А., Мацковский В. В., Кухта А. Е., Николаев Д. К. Возможности перекрестного датирования хронологий сосны обыкновенной и ели европейской в центральной части Восточно-Европейской равнины // Лесн. вестн. 2010. № 3. С. 67–75.

Bunn A. G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. V. 26. N. 2. P. 115–124.

Bunn A. G. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library // Dendrochronologia. 2010. V. 28. N. 4. P. 251–258.

Douglass A. E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. Washington DC: Carnegie Inst., 1919. 127 p.

Carroll A. L., Sillett S. C. Overcoming crossdating challenges to generate ring-width chronologies for Sequoia sempervirens across its native range // Dendrochronologia. 2023. V. 78. Article number 126063. 16 p.

Grissino-Mayer H. D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // Tree Ring Res. 2001. V. 57. N. 2. P. 205–221.

Helama S. Distinguishing type I and II errors in statistical tree-ring dating // Quatern. Geochron. 2023. V. 78. Article number 101470. 10 p.

Holmes R. L. Dendrochronology program library – user manual. Lab. tree-ring res., Univ. Arizona, Tucson, Arizona, USA, 1998. 130 p.

Levy E., Piasetzky E., Fantalkin A. Archaeological cross dating: a formalized scheme // Archaeol. Anthropol. Sci. 2021. V. 13. Iss. 1. Article number 184. 30 p.

Li D. If a tree grows no ring and no one is around: how scientists deal with missing tree rings // Climatic Change. 2022. V. 174. N. 1. P. 1–19.

Maxwell R. S., Wixom J. A., Hessl A. E. A comparison of two techniques for measuring and crossdating tree rings // Dendrochronologia. 2011. V. 29. N. 4. P. 237–243.

Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences / E. R. Cook, L. A. Kairiukstis (Eds.). Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.

R Core Team. R language definition. Vienna, Austria. 2000–2024. <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-lang.html>.

Riechelmann D. F. C., Fohlmeister J., Kluge T., Jochum K. P., Richter D. K., Deininger M. Evaluating the potential of tree-ring methodology for cross-dating of three annually laminated stalagmites from Zoolithencave (SE Germany) // Quatern. Geochron. 2019. N. 52. P. 37–50.

Rinn F. TSAP-Win. Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. User reference. Heidelberg, Germany, 2003. 110 p.

Römer P., Reinig F., Konter O., Friedrich R., Urban O., Čáslavský J., Pernicová N., Trnka M., Büntgen U., Esper J. Multi-proxy crossdating extends the longest high-elevation tree-ring chronology from the Mediterranean // Dendrochronologia. 2023. V. 79. Article number 126085. 9 p.

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

Weston S., Calaway R. Getting started with doParallel and foreach. The comprehensive R Archive Network, 2022. <https://cran.r-project.org/web/packages/doParallel/vignettes/gettingstarted Parallel.pdf>

REGULATION AND AUTOMATION OF CROSS DATING OF TREE-RING CHRONOLOGIES IN DENDROCHRONOLOGICAL STUDIES

V. A. Oskolkov, R. S. Moritz, V. I. Voronin, N. N. Michurin

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation*

E-mail: vosk@sifibr.irk.ru, mordendro@gmail.com, bioin@sifibr.irk.ru, NikitaDranik@Hotmail.com

The article discusses an approach to regulating and automating cross-dating, which is an integral stage in obtaining tree-ring chronologies. The process of cross-dating the width of annual rings, although it is widely used and can be produced using software tools, is still not fully regulated and depends on subjective factors. The classical approach to cross-dating is based on the selection of one or more individual tree-ring chronologies (ITRC) as reference, and sequential dating of the remaining series relative to the selected ones. This approach has a number of restrictions. Our approach actually repeats the classical cross-dating technique, but with the only difference that the main bias is towards automating the process. In this case, all ITRCs can act as references and be dated among themselves, combining into separate selections based on the correlation level. Thus, upon completion of the process, we will have many selections of well-dated ITRCs, despite the fact that the selections themselves will most likely correlate poorly with each other. The initial selection will contain ITRCs that do not correlate with each other. Analysis of correlation links within the finished selections can reveal individual ITRCs that spoil the overall signal. Such chronologies should be removed one by one, repeating the analysis of links within the selection. The simplest solution is to evaluate the correlation of each ITRC with the generalized tree-ring chronologies (GTRC) and remove the least correlating ITRC, reconstruct the GTRC and repeat the process. Verification of the “automated cross-dating” method was carried out when creating the GTRCs Muya 1510-2015AD; Muya1 107BC-2015AD and Muya2 3919-2053BC (Muya-Kuandinskaya Basin, Buryatia). The automated cross-dating method also made it possible to significantly improve the statistical marks and quality of the generalized tree-ring chronologies.

Keywords: *tree-ring chronology, cross-dating, regulation, automation, verification.*

How to cite: *Oskolkov V. A., Moritz R. S., Voronin V. I., Michurin N. N. Regulation and automation of cross dating of tree-ring chronologies in dendrochronological studies // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 1. P. 34–41 (in Russian with English abstract and references).*