

РАДИОУГЛЕРОД

(Материалы Всесоюзного совещания по проблеме "Вариации содержания радиоуглерода в атмосфере Земли и радиоуглеродное датирование", Вильнюс, 22-24 ноября 1971 года)

Б.А. Колчин, Т.Т. Битвинскас

О МЕТОДАХ И СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМАХ ДЕНДРОХРОНОЛОГИИ

В последнее десятилетие научные исследования в области дендрохронологии развивались по нескольким направлениям и достигли значительных успехов. Это объясняется прежде всего тем, что значительно расширились научные возможности получения дендрохронологической информации и, в первую очередь, данных о годовичных кольцах как индикаторах явлений природы в прошлом.

В настоящий момент дендрохронологию серьезно занимают лесоводы, биологи, климатологи, археологи, метеорологи, гидрологи, географы, астрофизики, экологи, ботаники, геофизики, этнографы и даже криминалисты. Одна из основных проблем — взаимосвязь между факторами среды и приростом деревьев — до настоящего времени наиболее сложной и, в некоторых аспектах, дискуссионной является. Мы напомним, что годовые колебания прироста зависят от биологических особенностей древесных пород, их происхождения, возраста и условий местопроизрастания, климатических факторов, температур и влажности, солнечной активности, полноты насаждения, плодородия, санитарного состояния дерева, наследственных свойств, стихийных причин и ряда других.

Основное положение дендрохронологии заключается в том, что ширина прироста годовичного кольца является наиболее чувствительным показателем, реагирующим на изменение условий произрастания дерева.

В зависимости от решения конкретных задач дендрохронологию в последние годы обычно делят на собственно дендрохронологию и дендроклиматологию. Дендрохронология занимается составлением дендрохронологических шкал, их перекрестной и временной связью, относительным и абсолютным датированием самих шкал и, наконец, датированием по этим шкалам тех или иных явлений природы и объектов. Предмет дендроклиматологии значительно шире. Дендроклиматологи выясняют качественные и количественные показатели связей солнечной активности, элементов климата и других явлений природы прошлого с годовичным приростом дерева или сообщества деревьев.

В статье мы рассмотрим вопросы, непосредственно связанные только с дендрохронологией. Для датировки и установления тех или иных закономерностей нужно получить и сопоставить дендрохронологическую шкалу с относительной, а затем и с абсолютной хронологией. Поэтому основные усилия исследователей, работающих в этой области, направлены на составление долговременных дендрохронологических шкал с привлечением наиболее рационального и массового материала. Значительных успехов в этой области достигли зарубежные дендрохронологи. В Европе и США в настоящее время работает несколько крупных лабораторий, среди которых можно отметить две наиболее значительных — лабораторию дендрохронологии Аризонского Университета в США и лабораторию дендрохронологии лесоботанического Института в Мюнхене.

В Советском Союзе составлением многолетних дендрохронологических шкал занимаются в дендрохронологической лаборатории Института археологии АН СССР, в дендроклиматологической лаборатории Института ботаники АН Литовской ССР, в лаборатории дендрохронологии Всесоюзного научно-исследовательского Института судебных экспертиз, в дендрохронологической группе Института экологии растений и животных Уральского филиала АН СССР, в лаборатории лесоведения АН СССР и в ряде других научных уч-

реждений.

На ширину годичного кольца из множества факторов два имеют преобладающее значение: первый — изменение возраста (сначала интенсивный рост молодняка, жердняка, средневозрастного насаждения; замедление ростовых процессов в целом насаждении; последующий очень медленный рост и отмирание старых деревьев) и второй — комплекс постоянно изменяющихся климатических факторов, под воздействием которых изменчивость ширины годичных колец теряет свой плавный вид и приобретает колебательно-циклический характер. Именно эти два свойства радиального прироста деревьев в континентальных широтах нашей планеты, где хорошо выражена изменчивость времен года, являются основой для дендрохронологических исследований. Сначала учитывается влияние возраста на радиальный прирост, затем выявляется степень влияния постоянно меняющихся комплексов климатических факторов на изменчивость радиального прироста.

Для учета фактора возраста, более четкого выявления влияния климатических факторов и для приведения дендрохронологических данных в сопоставимые величины в научной практике наиболее часто применяют следующие методы и приемы:

а. Исключение фактора времени путем расчета годичного кольца к стандартной прямой линии [1].

б. Алгебраические расчеты линейных и нелинейных зависимостей радиального прироста в зависимости от возраста [2-4 и др.].

в. Методы средних скользящих [5-7].

г. Методы спектрального анализа изменчивости годичных колец [8], в дальнейшем развитые в виде спектров угнетения [9].

д. Методы полулוגарифмических кривых для выравнивания влияния фактора возраста [10], математически обоснованные в работе [11], широко применяемые в ФРГ, Норвегии, Советском Союзе, ГДР и других странах в настоящее время.

В Соединенных Штатах (школа Дугласа) в настоящее время используется прием стандартных линий, заключающийся в том, что средняя годовая изменчивость ширины годичных слоев в зависимости от возраста выражается прямой линией. Этот прием оправдан для деревьев возрастом 200-2000 лет.

Европейские дендрохронологи и дендроклиматологи для аппроксимации возрастных кривых радиального прироста широко применяют скользящие (сдвигавшиеся) средние величины — индексы. Впервые скользящие кривые применил Аншгадт [5]. В 1938 г. он [12] использовал скользящие кривые для выявления изменчивости годичных слоев в зависимости от возраста при дендрохронологических исследованиях и для стандартизации серии годичных колец.

Ординг [2] и Руден [3] рассматривали применение скользящих и в дендроклиматологических целях.

На основе проверки массового материала Т.Т. Битвинскас [7] пришел к выводу, что зависимость радиального прироста от возраста у сосны обыкновенной, ели обыкновенной и других лесных пород, растущих в условиях средней полосы Европейской части СССР наиболее объективно отображается 20-летними скользящими кривыми. Способ Т. Битвинскаса 20-ти летних скользящих с шагом по пятилетиям и последующим графическим нахождением средней многолетней для каждого года заключается в следующем. Серия данных ширины годичных слоев суммируется по пятилетиям. Для соседних пятилетий суммируется по десятилетиям, а десятилетние суммы ширины колец суммируются по двадцатилетиям. Затем эта операция продолжается с кольцами со следующего пятилетия и т. д. до конца кривой, как бы скользя — передвигаясь по пятилетиям. Данные двадцатилетних сумм ширины годичных колец вписываются между 10 и 11, 15 и 16, 20 и 21 годичными слоями и так далее. Делением на двадцать получаем среднюю ширину годичных слоев в этом месте. Данные точки, соединенные линиями образуют плавную кривую, определяющую на графике среднюю ширину годичных слоев. Затем определяется индекс данного кольца, т. е. процентное отклонение фактического прироста от вычисленной средней нормы, полученной математически и графически. Расчет средних многолетних ради-

альных приростов по 5, 10 и 15-летним скользящим, как правило, не дает вполне удовлетворительных результатов, поскольку такие скользящие не выравнивают в достаточной мере изменения, происходящие под влиянием изменения комплекса климатических факторов.

В северных высокоширотных районах Советского Союза, как показывают Г. Комин [13] и С. Шиятов [14], даже 21-летние скользящие недостаточно выравнивают биологические кривые. В этих случаях необходимо применять или более длинные периоды, или другие методы. Для обработки деревьев, произрастающих в пессимальных условиях, у которых обычно слабо выражается биологическая кривая, а также и деревьев неизвестного происхождения или предложен новый метод определения индекса. За 100 % берется не кривая среднегодового прироста, как в [5, 7, 13], а кривая максимального прироста, которая проходит через вершины максимальных значений ширины кольца. Автор [14] считает, что такая кривая вариаций годичного прироста даст возможность более четко выявлять вековые колебания индексов прироста, что важно при работе с отдельными индивидуальными моделями.

Г. Гортински [15], анализируя погодичную динамику продуктивности слоев известоев южной таги, определяя погодичную изменчивость биомассы стволов не по ширине годичного слоя, а по площади сечения годичных слоев деревьев. Это бесспорно более совершенный и более объективный способ, отражающий закономерности изменчивости краевых и внутренних годичных колец деревьев, но он значительно увеличивает объем камеральной работы.

Метод полулогарифмических диаграмм [10, 11] основывается на положении, что величина изменения пропорциональна средней ширине годичного кольца. Если ширина одного годичного кольца "а", а другого "в", то отношение между ними можно выразить $\frac{b}{a} = c$. Различие же между кольцами выражается как $b - a$, т.е. теперь это различие $b - a$ можно выразить иначе формулой:

$$b - a = ac - a = a(c-1).$$

Это различие пропорционально "а". Если выразить различие с помощью логарифмов.

$$\log b - \log a = \log(ac) - \log a = \log c,$$

то оно станет независимым от "а" и пропорциональным "с". Следовательно, в полулогарифмическом графике различие между любыми двумя соседними годичными кольцами зависит не от их абсолютного размера, а от отношения их величин.

При составлении дендрохрол основным методом синхронизации кривых является визуальное сравнение графиков, выраженных в каких-либо принятых единицах и индексах. В последние годы применяются разнообразные математические методы для оценки степени схождения.

Применение разнообразных корреляционных методов не всегда дает уверенные и необходимые результаты. Работы М. Розанова [16] показали, что высокие корреляционные связи получаются только между изменчивостью радиального прироста отдельных частей ствола одного дерева (коэффициент корреляции 0,88 - 0,97). Изменчивость же радиального прироста отдельных сучьев с радиальным приростом стволовой древесины, а также радиальный прирост стволов разных деревьев одного местопроизрастания характеризуется низкими коэффициентами корреляции (0,6 - 0,7).

Для синхронизации данных по календарным годам Т. Битвинскас использовал процент схождения изменчивости [17]. Так как ширина годичных колец деревьев изменяется под влиянием внешних факторов, то можно учесть тенденцию их изменчивости в отношении одного к другому. Если разные деревья находились под влиянием одного и того же комплекса внешних факторов, значит тенденция изменчивости годичных колец у этих деревьев в определенный период должна быть сходной.

Сходство между кривыми или синхронность двух кривых (двух рядов чисел) численно характеризуется процентом схождения S_x [7]. Идеальное совпадение кривых соответствует $S_x = 100\%$. Асинхронность кривых выражается значением $< 50\%$. При большом числе

членов в исследуемых рядах цифр, выражающих изменчивость ширины годовичных слоев в случайном сопоставлении этих рядов (не по календарным годам) C_x приближается к 50 %.

C_x дендрошкал одной породы из одного района с абсолютно сходными условиями местопроизрастания довольно высок. Сосна с совершенно одинаковыми условиями местопроизрастания из двух разных лесничеств дает $C_x = 86$ %. Дендрошкала, отличающаяся по режиму влажности от первой шкалы дала с ней процент сходства в 77 %. С увеличением расстояния между лесными массивами C_x у отдельных дендрошкал несколько снижается. Поэтому, у дендрохронологов, работающих с недатированными образцами древесины из неизвестных районов местопроизрастания (особенно древней древесины) количество моделей, не находящихся себе места на дендрошкале, обычно бывает до 15-20 %. Опыт работы авторов показал, что для синхронизации и тем самым, для абсолютного датирования, подходит большинство дендрохронологических образцов с деревьев, росших на сухих, свежих и, частично, на влажных минеральных почвах (одной древесной породы). Не поддаются сравнению образцы древесины и дендрошкалы с резким различием местопроизрастания.

Фритте, Мосиман и Ботторф [19] предложили формулу, позволяющую рассчитывать средние многолетние кривые годовичного прироста разных конфигураций.

$$y = ae^{-bx} + k,$$

где y - ширина годовичного слоя в определенном году, a и b - вычисляемые для каждой серии константы,

k - свободный член функции, определяющий ее нижний предел.

Универсальность этой формулы позволяет составлять программы для ЭВМ по любым кривым годовичных вариаций.

Более перспективен путь [19] - максимально автоматизировать процесс дендрохронологического датирования с широким применением счетно-вычислительных устройств. Для синхронизации кривых Экштедта и Баух [19] выбрали коэффициент параллельных вариаций, который в настоящее время легко может быть просчитан на ЭВМ. Данные погодичных замеров и кривой наносятся на перфокарту. Кстати, недавно фирма Аддо (Addo) выпустила микроскоп, у которого во время замера абсолютных толщин годовичных колец этих данных сразу заносится на перфокарту.

В последнее время осуществлен ряд работ по установлению общегеографических закономерностей динамики годовичных приростов.

В работе [20] на основе анализа серии годовичных колец доказано существование единых минимумов прироста или одновременно на Аляске, Лабрадоре и в Северной Европе. К подобным выводам о синхронности в изменчивости прироста деревьев в географически удаленных районах пришел Н. Ловелиус [21].

Авторы [22] обнаружили наличие надежной сопряженности в погодично-изменчивости прироста еловых древостоев в географически отдаленных пунктах южной тайги.

Во многих радиоуглеродных лабораториях проводятся обширные работы по развитию и уточнению радиоуглеродного метода датирования. В Советском Союзе они проводятся в составе программы исследований по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод". В своей экспериментальной части эта программа состоит из:

- выяснения временной зависимости концентрации C^{14} в атмосфере Земли с целью получения информации об особенностях различных астрофизических и геофизических явлений, таких, например, как связи между вспышками сверхновых звезд и содержанием C^{14} в атмосфере Земли и ряд других [23];

- разработки современных методов измерения удельного содержания изотопов C^{14} и C^{13} с высокой точностью;

- Получения углеродосодержащих образцов (дерева) в достаточном для определения C^{14} количестве и, самое главное, разных периодов во времени с точностью временного интервала до одного года;

В решении последней задачи активное участие принимают дендрохронологи. В настоящее время Дендроклиматохронологическая лаборатория Института Ботаники Академии

наук Литовской ССР почти целиком занята вопросами создания коллекций образцов древесины отдельных годовичных колец. Для радиоуглеродного сцинтилляционного метода требуется от 100 до 500 граммов древесины для проведения одного анализа с высокой точностью. А для этого нужно еще создать высоковозрастные дендрошкалы с достаточным количеством самой древесины. Лаборатория уже подготовила в нужном количестве древесину годовичных колец деревьев за периоды 1688 - 1712 гг., 1593 - 1615 гг. и 1564 - 1583 гг., дали полностью материалы за три последние столетия.

В заключении еще раз отметим, что дендрохронологические исследования у нас в стране и за рубежом продолжают успешно развиваться. Это объясняется тем, что информация о прошлом природы, которую дают годовичные кольца, стоит на стыке очень многих наук. Но в то же время это же многообразие обуславливает некоторую стихийность в развитии метода, разноречивость в программах исследований и некоторую неорганизованность поиска дендрохронологических объектов и образцов.

— Важнейшей задачей дендрохронологических исследований в настоящее время является создание многовековых дендрохронологических шкал как хвойных пород, так и лиственных (дуба), при комплексном использовании современного леса, а также древесины архитектурных памятников и археологических объектов.

Изучение колебаний ширины годовичных колец древесных пород должно проходить по различным географическим регионам Советского Союза. Кроме того, необходимо составлять объединенными усилиями дендрохронологические профили по определенной породе, например сосне. На основе отдельных создана единая дендрошкала для одинаковых местопроизрастаний по географическому профилю: Закарпатская обл., Брестская обл., Гродненская обл., Литовская ССР, Латвийская ССР, Псковская, Новгородская, Ленинградская области, Карельская АССР, Мурманская обл.

Необходимо организовать совместные комплексные экспедиции по поиску многовековых деревьев в лесах Советского Союза.

Большие перспективы в настоящее время открывает поиск древней древесины в архитектурных сооружениях, особенно это относится к памятникам Севера.

Еще большие возможности, главным образом, во временном протяжении дают дендрохронологам археологические объекты. Для сбора древесины из археологических объектов всех эпох нужны организованные поиски и создание специальных экспедиций, работающих по определенной программе.

Важно дальнейшее развитие и технических сторон дендрохронологических исследований. Замер годовичных колец и запись результатов, а следует заметить, что это очень трудоемкая работа, необходимо как можно шире автоматизировать. Вариации годовичного прироста выражать не только графически кривыми, но и наносить на перфокарты, которые в дальнейшем могут быть обрабатываемы на ЭВМ по любой, выбранной для конкретного исследования, программе.

В заключение мы должны указать, что вероятно не все дендрошкалы окажутся в археологии пригодными и надежными пособиями для абсолютного датирования с точностью до одного года, но все они дадут материал большой ценности для развития и уточнения метода датирования по C^{14} . Мы не говорим уже о той огромной информации о прошлом нашей Земли и Космоса, записанной в годовичных кольцах деревьев, произраставших сто, тысячу и много тысяч лет тому назад. Но эту информацию мы должны еще научиться читать.

Литература

1. W.S. Glock. Panamerican geologist. V. LX August Geological Publishing company Des Moines, 1933.
2. A. Ording. Meddelelser fra det Norske skogforsøksvesen, Oslo, 27/2,314, 1941.
3. T. Ruden. Meddelelser fra det Norske skogforsøksvesen, Oslo, 42/2,255, 1945.
4. H.S. Fritts. J. Geophys. Res., 67, 1413, 1962.

5. S. Aandstad. *Nytt. Mag. Naturgid.*, Oslo, Nr. 74, 1934.
6. В.Е. Рудаков. Изв. Молдавской АН ССР, № 4-5 (7-8), 1952.
7. Т.Т. Фитвинская. Динамика прироста сосновых насаждений и возможности его прогноза. Диссертация, 1965.
8. W.S. Glock. *Principles and Methods of Tree-ring analysis*. Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1937.
9. Б.А. Колчин. Советская археология, № 1, М., 113, 1962.
10. B. Huber und W. Holdheide. *Berichte Deutscher Botanischer Gesellschaft*, X, 261, 1942.
11. T. Ruden. *Meddelelser fra det Norske skogforsøksvesen*, Oslo, Nr. 9, 231, 1945.
12. S. Aandstad. *Nytt. magasin f. naturvidensh.*, Oslo, 78, 201, 1938.
13. Г.Е. Комин. Труды института экологии растений и животных, вып. 67, 234, 1970.
14. С.Г. Шиятов. Экология, № 3, 85, 1970.
15. Г.Б. Гортинский. Об. Экспериментальное изучение биогеоценозов тайги, "Наука", Л., 33, 1969.
16. М.И. Розанов. Криминалистика и судебная экспертиза, вып. 2, 259, 1965.
17. B. Huber. *Holz*, B. 6, 263, 1943.
18. H. Fritts, D. Mosiman, Ch. Botforf. *Triering-bull.*, 1969.
19. D. Eckstein, J. Bauch. *Forstwiss. Cbl.*, 88, 4, 230, 1969.
20. J. Hustich. *Acta Geographica*, 15, Nr. 3, 1, Helsinki-Helsingfors, 1956.
21. Н.В. Ловелиус. Известия Всесоюзного географического общества, 102, 63, 1970.
22. Г.Б. Гортинский, А.И. Тарасов. Механизмы взаимодействия растений в биогеоценозах тайги. "Наука", Л., 40, 1969.
23. Г.Е. Кочаров. Труды Всесоюзного сов. по проб. "Астрофизические явления и радиоуглерод". Издание Тбилисского университета, Тбилиси, 1970.