

**П.П. Силкин, Н.В. Екимова**

Сибирский федеральный университет

Силкин Павел Павлович родился в 1969 г., окончил в 1994 г. Красноярский государственный университет, кандидат биологических наук, доцент кафедры биотехнологии, заведующий лабораторией функционирования лесных экосистем Института фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского федерального университета. Имеет более 50 печатных работ в области биофизики, дендрологии, дендрозоологии.  
E-mail: ppsilk@forest.akadem.ru; ppsilk@rambler.ru



Екимова Наталья Викторовна родилась в 1972 г., окончила в 1996 г. Иркутский государственный университет, кандидат биологических наук, докторант Сибирского федерального университета. Имеет более 40 печатных работ в области эволюционной биологии, дендрологии, дендрозоологии, популяционной генетики, биологии и стратегии выживания видов, экологического мониторинга, интродукции и ландшафтного дизайна.  
E-mail: ekimova\_n@mail.ru



## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КАЛЬЦИЯ В КЛЕТОЧНЫХ СТЕНКАХ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ХВОЙНЫХ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДЕНСИТОМЕТРИИ\***

**НА**

Рассмотрено влияние содержания ионов кальция в клеточных стенках трахеид на результаты рентгеновской денситометрии годичных колец хвойных. Проведены теоретические оценки рентгенографической плотности веществ основных компонентов клеточной стенки.

*Ключевые слова:* ионы кальция, клеточные стенки, рентгеновская денситометрия, годичные кольца, плотность пектиновых веществ.

Рентгеновская денситометрия годичных колец деревьев получила широкое распространение в мировой практике не только как надежный метод оценки качества древесины, но и как инструмент исследования в экологии и климатологии [12]. Согласно современным данным [12], годичные вариации плотности в разных зонах годичного кольца связаны с увлажнением и температурным режимом вегетационных периодов. Наиболее четко подобные связи проявляются в условиях действия одного лимитирующего фактора, например, в высоких широтах произрастания деревьев, где ограничивающим рост фактором является температура [5]. Однако работы, где бы рассматривался вопрос о влиянии элементного состава клеточных стенок трахеид годичных колец на результаты рентгеновской денситометрии, фактически отсутствуют. В статье К. Пернестала и Б. Джонссона [11] представлены данные подобных исследований, согласно которым может реализоваться ситуация, когда элементный состав годичных колец внесет в результаты рентгеновской денситометрии ошибку более 2 %. Из результатов, полученных нами ранее [8, 13], следует, что существует хорошо выраженная связь между рентгенографической плотностью\* клеточной стенки древесины двух видов хвойных (лиственница и сосна) и ее толщиной. При этом абсолютные значения рентгенографической плотности клеточных стенок в ранней древесине приближаются к плотности алюминия [8]. Данный результат является неожиданным, так как принято считать, что реальная гравиметрическая плотность годичного кольца полностью совпадает с ее рентгенографической плотностью, измеренной методами рентгеновской денситометрии [12]. Причину различия между рентгенографической и гравиметрической плотностью годичных колец хвойных следует искать в наличии минеральных включений в клеточных стенках, которые более эффективно, по сравнению с органическими элементами, поглощают рентгеновское излучение, что может приводить к завышению результатов рентгеновской денситометрии. Наиболее высокие концентрации в клеточных стенках имеет

\* Работа поддержана грантом РФФИ 08-04-00296 и аналитической ведомственной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-10 гг.)». «История климата голоцена Евразии по дендроклиматическим данным», №2.1.1/6131.

© Силкин П.П., Екимова Н.В., 2012

\* В контексте данной статьи под термином «рентгенографическая плотность» подразумевается физическая плотность вещества, измеренная методами рентгеновской денситометрии.

кальций, который входит в состав пектиновых веществ [1, 6], поэтому в данной работе акцент сделан именно на нем.

### Методы и материалы

Теоретическая оценка влияния содержания кальция в клеточных стенках на результаты рентгеновской денситометрии на данном этапе исследований представляется наиболее эффективным методом, позволяющим получить данные об эффекте, анализ которого покажет перспективность дальнейших экспериментальных исследований. В качестве минерального включения рассматривался пектат кальция, наличие которого в срединной пластинке годовичных колец хвойных не вызывает сомнений [1, 6].

Рентгеновская денситометрия годовичных колец основана на явлении поглощения рентгеновских лучей конденсированным веществом по следующему закону [4]:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где  $I_0, I$  – интенсивности пучка до попадания в вещество и после прохождения в нем расстояния  $x$ ;

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения,  $\text{см}^{-1}$ .

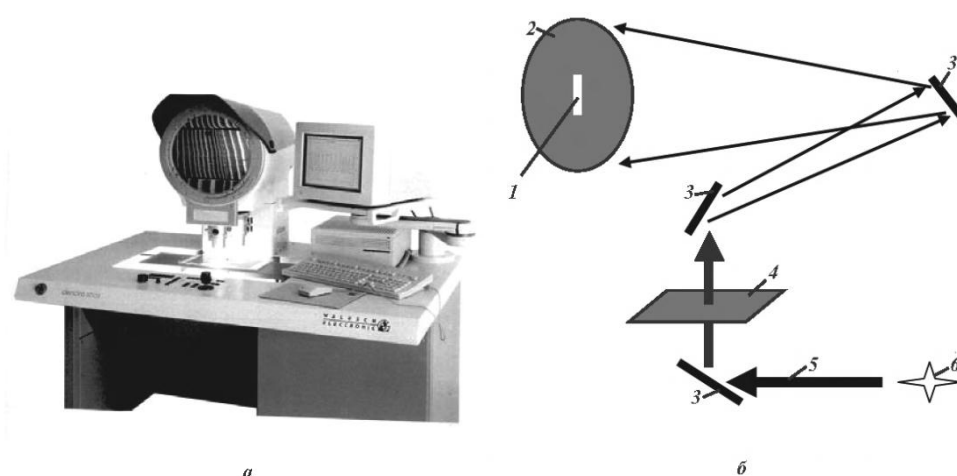


Рис. 1. Общий вид денситометра DENDRO-2003 (а) и его оптическая схема (б):  
1 – оптический сенсор, 2 – матовый экран, 3 – система зеркал, 4 – рентгеновское изображение годовичных колец, 5 – калиброванный пучок света

Величина  $1/\mu$  равна расстоянию, на котором пучок фотонов ослабляется в  $e$  раз и является средним свободным пробегом фотона в веществе до взаимодействия с атомом.

В качестве измерителя плотности годовичных колец использовали денситометрический комплекс DENDRO-2003 производства фирмы «Walesch Electronics» (Швейцария). На рис. 1 приведены фотография и оптическая схема собственно измерителя плотности. Кроме того, денситометрический комплекс включает в себя рентгеновский аппарат, экстракционную установку (аппарат Сокслета) и двухлезвенный фрезерный станок, с помощью которого из образцов древесины выпиливаются плоскопараллельные пластинки одинаковой толщины (рис. 2, а). Плоскость распила должна проходить перпендикулярно направлению трахеид в образце. С помощью аппарата Сокслета из образцов удаляются смолы, так как они дополнительно к клеточным стенкам поглощают рентгеновское излучение, что приводит к ошибкам измерения плотности [12]. Подготовленные таким образом пластинки экспонируются в рентгеновских лучах в целях получения высококонтрастного рентгеновского снимка годовичных колец. Экспонирование проводится в диапазоне мягкого рентгеновского излучения небольшой интенсивности в течение продолжительного времени. Как правило, устанавливают следующий режим работы рентгеновской трубки: напряжение на аноде – 8...15 кВ, ток анода – 18 мА, время экспозиции – в пределах 1 ч. После проявки рентгеновской пленки получается изображение годовичных колец в рентгеновском диапазоне длин волн вместе с изображением калибровочного клина из ацетата целлюлозы (рис. 2, б). Собственно плотность годовичных колец измеряют по изменению интенсивности пучка света (см. рис. 1, б), проходящего через изображение участка годовичного

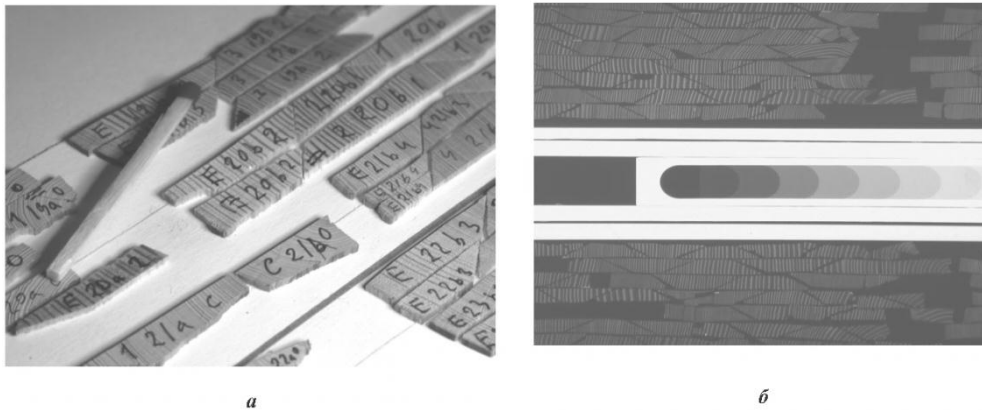


Рис. 2. Образцы годовичных колец лиственницы, подготовленные для рентгенографии (а) и участок рентгеновской пленки с изображением годовичных колец и

кольца на рентгеновской пленке, с последующим пересчетом в физическую плотность. Пространственное разрешение данной аппаратуры достаточно велико. Толщина проекции фотосенсора на плоскость рентгеновской пленки составляет 10 мкм при шаге ее перемещения с помощью электрических приводов 3 мкм, что позволяет измерять профиль плотности годовичных колец вдоль радиального направления. Более подробно с методами рентгеновской денситометрии можно ознакомиться в [7, 9, 12].

Анализ работы денситометра DENDRO-2003 показал, что измеренная с его помощью рентгенографическая плотность  $P$  образца связана с физическими характеристиками  $\mu$  и  $x$  следующим выражением [9]:

$$P = 0,4x\mu. \quad (2)$$

Здесь  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения образца толщиной  $x$ .

Линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения химическим соединением можно рассчитать с помощью выражения [4]:

$$\mu = \frac{\rho}{M} \sum_{i=1}^k n_i M_i \mu_{mi}, \quad (3)$$

где  $\rho$  и  $M$  – гравиметрическая плотность и молярная масса химического соединения;

$n_i$  – количество атомов  $i$ -го элемента в соединении;

$M_i$  и  $\mu_{mi}$  – относительная атомная масса и массовый коэффициент ослабления  $i$ -го элемента.

Таким образом, зная химическую формулу вещества, с помощью выражений (2) и (3) можно рассчитать теоретическое значение его рентгенографической плотности, не прибегая к прямому измерению с помощью денситометра DENDRO-2003. Для сравнения, кроме рентгенографической плотности пектата кальция, рассчитывали рентгенографическую плотность лигнина, целлюлозы и пектинового вещества без ионов кальция.

#### Результаты и выводы

Молекула пектата кальция образована несколькими молекулами  $d$ -галактуроновой кислоты, два атома водорода в которой замещены ионами  $\text{Ca}^+$  [1, 6]. В работе использовалась химическая формула пектата кальция  $\text{C}_{32}\text{H}_{36}\text{O}_{28}\text{Ca}_2$  [6, 10]. Для сравнения рассматривалась химическая формула пектата кальция, в которой ионы кальция заменены ионами водорода ( $\text{C}_{32}\text{H}_{38}\text{O}_{28}$ ), а также два других основных компонента клеточной стенки: целлюлоза ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) и лигнин ( $\text{C}_{57}\text{H}_{60}\text{O}_{10}$ ) [6, 10]. Рентгенографическую плотность рассчитывали согласно выражениям (2) и (3). Массовые коэффициенты ослабления элементов были взяты из рентгеноспектрального справочника [3] для длины волны  $\lambda = 2,1874 \text{ \AA}$ , соответствующей максимальной интенсивности тормозного излучения рентгеновской трубки при напряжении на аноде

8,5 кВ [2]. Гравиметрическую плотность вещества принимали равной  $1,4 \text{ г/см}^3$ , толщину образцов – 0,1 см (как при приготовлении образцов для рентгеновской денситометрии).

Результаты расчетов с помощью выражений (2) и (3) рентгенографических плотностей и линейных коэффициентов ослабления рентгеновского излучения целлюлозы, лигнина и пектата кальция приведены в таблице.

| Вещество                                   | $\mu$ , см <sup>-1</sup> | $P$ , г/см <sup>3</sup> |
|--|--------------------------|-------------------------|
| Целлюлоза                                  | 33,2                     | 1,37                    |
| Лигнин                                     | 22,0                     | 0,95                    |
| Пектат кальция                             | 77,7                     | 3,20                    |
| Формула пектата кальция без атомов кальция | 31,3                     | 1,29                    |

Согласно анализу полученных результатов можно заключить, что целлюлоза, лигнин и пектат кальция без атомов кальция не имеют высоких рентгенографических плотностей. Рентгенографическая плотность пектата кальция имеет высокое значение, превышающее плотность алюминия, равную 2,7 г/см<sup>3</sup>. Сравнение рентгенографических плотностей пектата кальция и пектата кальция без атомов кальция (с метилированными участками карбоксильных групп) показало, как сильно может повлиять на результаты рентгеновской денситометрии относительно небольшое изменение химического состава клеточных оболочек. Данный факт может служить основой для объяснения высокой рентгенографической плотности клеточных стенок в ранней древесине за счет повышения содержания в них ионов кальция.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардинская М.С. Растительные клеточные стенки и их образование. М.: Наука, 1964. 160 с.
2. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1957. 518 с.
3. Блохин М.А., Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, 1982. 376 с.
4. Бокий Г.Б., Порай-Кошиц М.А. Рентгеноструктурный анализ. М.: Изд-во МГУ, 1964. Т. 1. 492 с.
5. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 214 с.
6. Раздорский В.Ф. Анатомия растений. М.: Сов. наука, 1949. 524 с.
7. Силкин П.П. Метод измерения массы и плотности клеточных стенок трахеид хвойных. Оценка работоспособности метода//Материалы III конф. молодых ученых, посвященной М.А. Лаврентьеву. Новосибирск, 2003. С. 129–133.
8. Силкин П.П. Измерение сезонного накопления массы клеточными стенками трахеид //Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды: тез. докл. Всеросс. совещания. Иркутск, 2000. С. 89.
9. Силкин П.П. Многопараметрический анализ структуры годичных колец в дендрозкологических исследованиях: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 34 с.
10. Химическая энциклопедия. М.: Изд-во БЭС, 1998. Т. 5. С. 662–667.
11. Pernestal K., B. Jonsson B. On the accuracy of density measurement by means of x-ray absorption. The influence of the elementary composition of wood on the mass absorption coefficient //Avdelningen för skogsuppskattning och skogsindelning. Rapport. 1991. N 22. P. 1–28.
12. Silkin P.P. Cell-wall masses of conifer tree ring //Tree Rings and People: Abstracts of International Conference on the Future of Dendrochronology. Davos, Switzerland, 2001. P. 202.
13. Schweingruber F.H. Tree-Ring: Basics and Applications of Dendrochronology. Dordrecht: Reidel. Publ., 1988. 276 p.

Поступила 07.12.09

*P.P. Silkin, N.V. Yekimova*  
Siberian Federal University

#### **Theoretical Assessment of Effect of Calcium Content in the Cell Walls of Annual Rings of Coniferous Species on the x-ray Densitometry Results**

Effect of calcium ions content in the tracheid cell walls on the x-ray densitometry results of annual rings of coniferous species has been studied. Rapid increase of x-ray densitometry of pectine compared to other components leads to high density of cell wall in a whole.

*Key words:* calcium content, cell wall, densitometry, coniferous species, pectin, annual ring.