

УДК 581.5+574.24+630.181+343.98

А. Н. Хох¹, В. Б. Звягинцев²

¹Заведующий лабораторией исследования материалов, веществ и изделий научного отдела технических и специальных исследований, Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

²Кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения, УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Республика Беларусь

ИЗУЧЕНИЕ АНАТОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОДИЧНЫХ СЛОЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕСТА ПРОИЗРАСТАНИЯ

В статье рассматривается вопрос о влиянии локальных географических и климатических условий места произрастания на биометрические характеристики древесины сосны на примере ее микростроения. Определены величины таких показателей, как количество ранних и поздних трахеид, размеры их полостей и толщины стенок, диаметры вертикальных смоляных ходов. Выявленные особенности формирования анатомической структуры годичного слоя у деревьев, произрастающих на 10 временных пробных площадях в Могилевской области Республики Беларусь, позволяют провести дифференциацию исследованных территорий. Анатомические признаки обладают большей чувствительностью к изменению факторов окружающей среды, чем общая ширина годичного слоя, а потому могут быть эффективно использованы в комплексе с классическим дендрохронологическим анализом при решении вопросов, связанных с установлением места произрастания древесины.

Ключевые слова: место произрастания, сосна обыкновенная, анатомические признаки, экологические факторы, трахеиды, кластерный анализ, ширина годичного слоя.

Введение

В Республике Беларусь сосновые лесо- и пиломатериалы относятся к группе товаров, установить происхождение которых не всегда представляется возможным. Перспективным методом для решения этой задачи является дендрохронологический анализ [1]–[4]. Однако в ряде случаев с его помощью возможно установить только принадлежность исследуемых объектов достаточно большим по площади территориям. Это связано с тем, что наша страна характеризуется мягким умеренным климатом с отсутствием ярко выраженных климатических факторов, которые бы лимитировали радиальный прирост. Кроме того, интенсивная лесохозяйственная деятельность, наблюдающаяся в последние годы даже на особо охраняемых территориях, таких как НП «Беловежская пуца», ГПУ «Березинский биосферный заповедник», НП «Припятский», приводит к тому, что в процессе роста древостоя в эксплуатируемых лесах на каждом таксационном выделе формируются уникальные древесно-кольцевые хронологии. С одной стороны, это облегчает привязку сосновых лесоматериалов к конкретным насаждениям, что легко выполнимо при наличии под подозрением одного или нескольких участков леса, а с другой, затрудняет решение задач по установлению региональной принадлежности при отсутствии таковых. Учитывая вышеперечисленные факты, считаем, что назрела необходимость повысить разрешающую способность дендроанализа за счет привлечения данных об анатомической структуре годичных слоев (ГС), что позволит выявить гетерогенность внутри дендрохронологически однородных регионов, сузить групповую принадлежность и подтвердить/опровергнуть декларируемое место заготовки древесины.

Объектами данного исследования были выбраны сосновые насаждения мшистого типа леса, которые занимают более 40 % от всей площади сосновых лесов. Для них характерны слегка повышенные, ровные или волнистые местоположения. Почвы дерново-подзолистые, песчаные, иногда легкосупесчаные, свежие. Состав древостоя: 7–10С до 3Е,Бб,Ос, иногда Д. Бонитет в основном I–II.

Цель работы – проанализировать вариабельность некоторых анатомических элементов годичных слоев сосны обыкновенной в зависимости от локальных экологических условий местопроизрастания.

Материалы и методы исследования

В исследовании использован экспериментальный дендрохронологический материал (буровые керны) с 10 временных пробных площадей (ВПП), заложенных в 2015–2016 гг. на территории Могилевской области по принятым в области лесоведения и лесной таксации методикам [5]. В таблице 1 приведена краткая характеристика исследованных древостоев, а их территориальное расположение – на рисунке 1.

Таблица 1. – Таксационные показатели древостоев на ВПП

№ ВПП	Лесхоз	Лесничество	Квартал	ТУМ	Состав древостоя	Возраст, лет	Класс бонитета	Полнота
MR01	Бобруйский	Приберезинское	57	A2	10С	120	II	0,6
MR02	Осиповичский опытный лесхоз	Дричинское	50	A2	10С	115	I	0,8
MR03	Быховский	Новобыховское	117	A2	8С1Д1Е	130	I	0,8
MR04	Краснопольский	Старинковское	53	A2	9С1Е+Д	120	II	0,8
MR05	Костюковичский	Белынквичское	141	A2	10С	105	II	0,6
MR06	Костюковичский	Хотимское	23	A2	9С1Е	125	I	0,7
MR07	Костюковичский	Хотимское	28	A2	10С	115	I	0,9
MR08	Чериковский	Лименское	20	A2	10С	135	I	0,7
MR09	Бельничский	Осовецкое	37	A2	10С	95	I	0,8
MR10	Бельничский	Техтинское	8	A2	10С	85	I	0,8

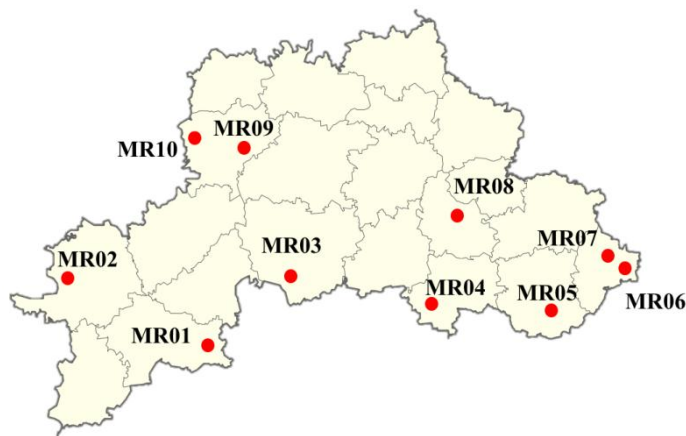


Рисунок 1. – Схема расположения объектов исследования

На каждой пробной площади образцы древесины отбирались у 20 деревьев высших классов Крафта (господствующие и согосподствующие) возрастным буром «Haglof» с противоположных сторон перпендикулярно продольной оси ствола дерева на высоте 1,0–1,3 м от поверхности земли.

Перед проведением измерений ширины годичных слоев, а также их анатомических параметров с буровыми кернами был осуществлен ряд подготовительных операций. Сначала образцы замачивали на 10–15 минут в горячей воде, что значительно облегчало последующую обрезку. Затем ножом pistolетным с выдвижным трапециевидным лезвием в поперечном направлении срезали верхнюю часть толщиной 1–1,5 мм. Для удобства обрезки и предотвращения разлома керн закрепляли с помощью винтов на металлическом кернодержателе. Старались добиться максимально ровной плоскости и избежать образования царапин и др. изъянов на поверхности образца.

Подготовленные образцы древесины сканировали на планшетном сканере Epson Perfection V19 с разрешением 1200 dpi. Сами расчеты параметров радиального прироста выполняли с помощью автоматизированного рабочего места «DendroExp» (с точностью до 0,01 мм) [6].

Анатомические параметры ранней и поздней древесины ГС изучали по направлению от коры к сердцевине с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения «MIRA3» фирмы «Tescan» (Чехия) при увеличении x100, x200, x500, x1000 на базе ГУ «Научно-

исследовательский институт порошковой металлургии». Подсчет количества трахеид, измерение размеров их полостей и толщины стенок отдельно для ранней и поздней древесины, а также диаметра вертикальных смоляных ходов проводили в последних 30-ти годичных слоях каждого образца древесины по полученным цифровым изображениям с помощью программы MCview (ЛОМО-Microsystems). Во всех случаях измеряли двойную толщину стенки трахеид, т. е. от полости одной трахеиды до полости другой. В ранней зоне толщину стенок измеряли между полостями 2-й и 3-й, 3-й и 4-й трахеид, считая от границы предыдущего ГС по радиусу; в поздней измерялась толщина стенок «срединной» трахеиды этой зоны. Далее парные измерения по каждому дереву усреднялись, затем проводилось усреднение для всех исследованных деревьев на каждой пробной площади. Для разграничения ранней и поздней древесины применяли «правило Морка», согласно которому к ранним трахеидам относятся клетки, радиальный размер просвета у которых превосходит удвоенную толщину клетки в том же радиальном направлении больше чем в 2 раза [7].

Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакетов прикладных программ Excel и Statistica. Для проверки качества перекрестного датирования использовали программу COFECHA, для стандартизации ширины годичных слоев – программу ARSTAN.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного исследования были построены 10 обобщенных стандартизированных древесно-кольцевых хронологий (ДКХ). Стандартизация для элиминирования возрастного тренда, проводилась отдельно для каждого дерева с дальнейшим усреднением индексов радиального прироста по объекту (т. е. временной пробной площади) [8], [9].

В таблице 2 приведены показатели изменчивости ширины годичных слоев в полученных хронологиях.

Таблица 2. – Статистические характеристики ДКХ

№№ДКХ	M_x , мкм	min, мм	max, мм	S_x	m_x	V, %	COR	SNS	SNR
1	1,72	0,65	5,75	1,16	0,11	63,87	0,65	0,18	37,14
2	1,69	0,80	4,40	0,64	0,06	37,62	0,67	0,19	40,61
3	1,48	0,67	3,18	0,51	0,04	34,30	0,75	0,17	60,00
4	1,79	0,90	4,00	0,66	0,06	34,93	0,58	0,18	27,62
5	1,82	0,40	4,10	0,74	0,07	42,18	0,73	0,17	54,07
6	1,87	0,40	5,40	1,06	0,10	71,75	0,69	0,20	44,52
7	1,87	0,40	6,30	1,27	0,12	72,15	0,65	0,21	37,14
8	1,79	0,70	4,50	0,81	0,07	45,19	0,71	0,20	48,97
9	1,96	0,30	6,50	1,32	0,12	34,93	0,65	0,20	37,14
10	1,27	0,40	3,40	0,60	0,06	42,18	0,60	0,22	30,00

Примечание – M_x – среднее арифметическое значение ширины годичного слоя; min, max – минимальное и максимальное значения ширины годичного слоя; S_x – среднеквадратичное отклонение; m_x – ошибка среднего; V – коэффициент вариации; COR – средний межсерийный коэффициент корреляции; SNS – коэффициент чувствительности; SNR – коэффициент «сигнал – шум»

Как показал анализ полученных результатов, ширина годичных слоев у исследованных деревьев сосны варьируют от 0,30 до 6,50 мм. Величина стандартного отклонения максимальна у деревьев на ВПП № 7 (1,27), а минимальна – на ВПП № 3 (0,51). Наименьшая вариация наблюдалась для ДКХ № 3 (34,30 %), тогда как наибольшей она была для ДКХ № 7 (72,15 %). Отмечен высокий межсерийный коэффициент корреляции: 0,58–0,75, что и позволило объединить индивидуальные ДКХ в обобщенные. Средний коэффициент чувствительности хронологий сосны в исследованных древостоях составляет 0,19 и колеблется в небольших пределах от 0,17 до 0,22. Рассчитанные значения коэффициента «сигнал – шум» показали, что обобщенные ДКХ характеризуются достаточно высокой изменчивостью. Согласованность изменений радиального прироста сосны обыкновенной на разных ВПП оценивалась по рассчитанным коэффициентам корреляции Пирсона (R). В результате выявлено, что все полученные древесно-кольцевые хронологии № 1–10 показывают между собой достаточно высокую корреляцию ($R \geq 0,5$).

Для предварительной регионализации исследованных ДКХ проводили кластерный анализ. Метрика для учета различий в динамике радиального прироста по каждому году – 1-г Пирсона, алгоритм кластеризации – метод Уорда. Полученные результаты представлены на дендрограмме (рисунок 2).

Продолжение таблицы 3

MR09	M_x	0,41	0,95	1,43	1,34	1,28	3,01	2,06	1,48	1,01	0,93
	S_x	40,93	35,81	25,81	14,31	82,16	80,35	30,41	17,24	3,12	5,91
MR10	M_x	1,17	0,76	2,09	0,89	2,24	3,23	2,16	1,15	0,99	0,99
	S_x	41,12	38,51	28,21	13,72	80,31	76,12	30,42	17,31	3,22	5,67
one-sampl t-test		22,66	15,92	12,83	15,8	23,8	21,87	31,41	57,33	18,16	32,64

Примечание – M_x – среднее арифметическое значение ширины годичного слоя; S_x – среднеквадратичное отклонение

Из таблицы 3 можно видеть, что проанализированный спектр показателей анатомического строения древесины сосны характеризуется большим разнообразием. Так, например, максимальное количество ранних трахеид (как собственно и M_x ширины годичного слоя) характерно для MR05, MR06 и MR07, а минимальное – для MR08; количество поздних трахеид максимально для MR09 и MR10, минимально – для MR01 и MR03.

Для оценки достоверности наблюдаемых различий использовали одновыборочный t-тест и сравнивали каждый показатель с рассчитанным для него средним. Так как критерий Стьюдента основан на проверке статистических гипотез, то за нулевую гипотезу принимали тот факт, что различия между сравниваемыми параметрами отсутствуют. В результате было показано, что по всем исследуемым характеристикам анатомического строения древесины сосны выявляются статистически значимые различия ($p < 0,001$), т. е. действительно локальные географические и климатические условия места произрастания оказывают влияние на биометрические характеристики анатомической структуры древесины сосны. Далее по рассчитанным биометрическим показателям анатомической структуры ГС (с учетом общих характеристик исследованных ДКХ) повторно проводили кластерный анализ по дистанции 1-г Пирсона, используя метод Уорда. Результаты проведенной иерархической классификации представлены на рисунке 3.

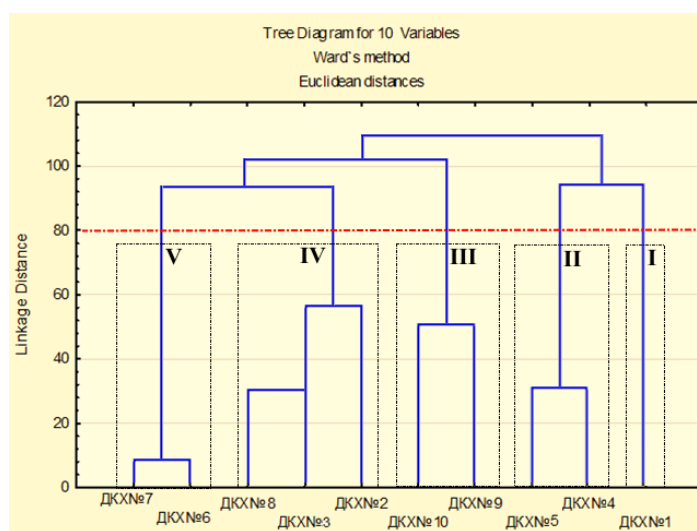


Рисунок 3. – Связь между анатомическими признаками исследованных древостоев по результатам кластерного анализа (штрихпунктиром показано пороговое расстояние)

На полученной дендрограмме четко выявляются пять кластеров. Пороговое расстояние составляет 80, что значительно превышает его значение в первом случае (4). Чем больше расстояние, тем более статистически значимой является проведенная дифференциация образцов.

Первый кластер сформирован одной ДКХ № 1, второй, третий и пятый – двумя – ДКХ № 4–5, ДКХ № 9–10 и ДКХ № 6–7 соответственно, четвертый образован тремя хронологиями (ДКХ № 2–3, 8), при этом ДКХ № 2–3 более сходны между собой, чем с ДКХ № 8. В целом можно отметить, что привлечение информации о биометрических характеристиках анатомической структуры годичных слоев *Pinus sylvestris* L. позволило выявить большую гетерогенность внутри исследованного дендрохронологически однородного региона. Так, по сравнению с 3-мя слабо дифференцируемыми

кластерами, удалось выделить пять, т. е. сузить групповую принадлежность ДКХ, что имеет важное значение при решении задач, связанных с установлением места произрастания срубленной древесины.

Для оценки качества кластеризации был выполнен кластерный анализ по сокращенному набору переменных; полученные результаты оказались полностью сопоставимы с полученными на основе полного набора переменных.

Также мы определяли структуру взаимосвязей между исследованными параметрами анатомического строения годичных слоев. Для этого строили корреляционную матрицу, которая приведена в таблице 4.

Таблица 4. – Коэффициенты корреляции анатомических показателей годичных слоев

Переменная	n PT	n ПТ	РрпРТ	РрпПТ	Рдвсх	Тдвсх	ТрпРТ	ТрпПТ	ТдксРТ	ТдксПТ
n PT	1,00	0,07	-0,15	-0,15	0,79	0,81	0,42	0,37	0,56	-0,88
n ПТ	0,07	1,00	-0,58	0,47	0,22	0,23	-0,54	-0,02	-0,33	-0,01
РрпРТ	-	-	1,00	-0,72	0,17	0,15	0,63	0,22	-0,04	-0,03
РрпПТ	-	0,47	-0,72	1,00	-0,30	-0,26	-0,44	0,16	-0,33	0,19
Рдвсх	0,79	0,22	0,17	-0,30	1,00	0,99	0,59	0,36	0,31	-0,76
Тдвсх	0,81	0,23	0,15	-0,26	0,99	1,00	0,56	0,42	0,24	-0,80
ТрпРТ	0,42	-	0,63	-0,44	0,59	0,56	1,00	0,48	0,30	-0,49
ТрпПТ	0,37	-	0,22	0,16	0,36	0,42	0,48	1,00	-0,04	-0,41
ТдксРТ	0,56	-	-0,04	-0,33	0,31	0,24	0,30	-0,04	1,00	-0,40
ТдксПТ	-	-	-0,03	0,19	-0,76	-0,80	-0,49	-0,41	-0,40	1,00

Примечание – Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на уровне $p < 0,05$.

Попарно сопоставляя переменные из таблицы 3 можно получить некоторое представление об их связях и закономерностях. Однако сами по себе эти коэффициенты лишь констатируют факт наличия корреляции между парой сравниваемых биометрических показателей. Далее по стандартным процедурам факторного анализа вычисляли значения главных компонент, определяющих территориальную дифференциацию исследованных ДКХ. В настоящей работе приведены только основные определяющие результаты вычислений.

Во-первых, это матрица факторных нагрузок, выполняющих роль коэффициентов корреляции каждого биометрического показателя с каждым из 3-х выделенных нами по критерию Кайзера факторов (главных компонент) (таблица 5).

Таблица 5. – Факторные нагрузки 3-х выделенных главных факторов

Переменная	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
n PT	-0,856720	0,361003	-0,239498
n ПТ	0,128377	0,852514	0,164456
РрпРТ	-0,321219	-0,833653	0,331452
РрпПТ	0,427885	0,683181	0,269209
Рдвсх	-0,895064	0,278404	0,104952
Тдвсх	-0,909407	0,241762	0,073198
ТрпРТ	-0,761452	-0,464696	0,242872
ТрпПТ	-0,494721	0,105056	0,647173
ТдксРТ	-0,502422	-0,078819	-0,727803
ТдксПТ	0,853277	-0,272707	0,076094

Примечание – Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на уровне $p < 0,05$.

Если факторные нагрузки больше $|0,75|$, то это соответствует сильным корреляциям показателей с факторами. Как видно из таблицы 5, максимальное количество таких нагрузок – 5 – соответствует фактору 1.

Во-вторых, для перехода к окончательному толкованию вычисленных математических факторов для регионализации исследованных ДКХ требовалось узнать вклад каждого из них и их суммарный накопленный (кумулятивный) вклад. Эти данные приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Собственные значения факторов и накопленная (кумулятивная) информация в процентах, объясненные главными компонентами (математическими факторами)

Фактор	Собственное значение	Процент описания общей дисперсии	Кумулятивное собственное значение	Кумулятивный процент
1	2	3	4	5
1	4,47	44,70	4,47	44,70
2	2,46	24,62	6,93	69,32
3	1,30	12,96	8,23	82,29

В первом столбце таблицы 6 даны собственные значения, во втором – процент общей дисперсии, соответствующий этим собственным значениям, далее кумулятивные или накопленные собственные значения (собственные значения суммируются $4,47 + 2,46 = 6,93$ и т. д.) и кумулятивный процент дисперсии ($44,70 + 24,62 = 69,32$ и т. д.). Собственные значения представлены в порядке убывания, отражая тем самым степень важности соответствующих выделенных факторов для объяснения вариации исходных данных.

Из таблицы 6 видно, что максимальную изменчивость – 44,70 % – описывает фактор 1, т. е. это и есть первая главная компонента. Наиболее тесно эта новая переменная связана со следующими биометрическими показателями: n_{PT} – количество ранних трахеид; $R_{двсх}$ – радиальный диаметр вертикального смоляного хода, мкм; $T_{двсх}$ – тангенциальный диаметр вертикального смоляного хода, мкм; $T_{рпPT}$ – тангенциальный размер полостей ранних трахеид, мкм; $T_{дкспТ}$ – толщина двойной клеточной стенки поздних трахеид, мкм.

Проведенный факторный анализ позволил выделить особо выраженные попарные корреляционные взаимосвязи биометрических показателей, сжать эту комплексную 10-ти мерную исходную информацию до трёхмерного пространства, а сами эти взаимосвязи значительно контрастировать. Его результаты можно считать удовлетворительными, так как тремя выделенными главными факторами (компонентами) упорядочено и объяснено 83,29 % всей дисперсии по 10-ти биометрическим показателям анатомической структуры годичных слоев, т. е. именно этими факторами и определяется территориальная дифференциация исследованных ДКХ. Остальные 16,71 % – это остаток корреляций между показателями, статистическая достоверность которых не доказана. Общий вид выявленной факторной картины дает основание для статистически доказанного использования анатомических параметров ГС, особенно скоррелированных с фактором 1 (таблица 5), при установлении места произрастания.

Выводы

В целом полученные результаты проведенного нами исследования подтверждают, что формирование особенностей анатомической структуры годичного слоя зависит от локальных географических и климатических факторов места произрастания и отличается большей чувствительностью к их изменению, чем общие параметры радиального прироста. Поэтому можно констатировать, что использование только одного дендрохронологического метода исследований не является оптимальным для разделения совокупности древесно-кольцевых хронологий сосны. Сказанное не означает, что следует отказаться от дендрохронологии, напротив, на основе данных именно этого метода с учетом информации об ультратонком строении годичных слоев можно эффективно решать задачи, связанные с идентификацией места произрастания и выявлять гетерогенность в дендрохронологически однородных регионах. Применение же методов многомерного статистического анализа позволяет проанализировать большой массив количественных данных и дать подробную характеристику сходства и различия тестируемых ДКХ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розанов, М. И. Установление источника происхождения дерева / Криминалистическое исследование вещественных доказательств физическими, химическими и биологическими методами / М. И. Розанов // ЦНИИСЭД. – М., 1969. – Вып. 2. – С. 34–36.

2. Жаворонков, Ю. М. Судебная дендрохронология на службе криминалистики XXI века / Ю. М. Жаворонков // Вестник Московского государственного университета леса. – 2014. – Т. 18. – № 5. – С. 53–57.
3. Dormontt, E. E. Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging / E. E. Dormontt // Biological Conservation. – 2015. – V. 191. – P. 790–798.
4. Yaman, B. The use of dendrochronological method in dating of illegal tree cuttings in Turkey: a case study / B. Yaman, U. Akkemik // Baltic Forestry. – 2009. – V. 15. – № 1. – P. 122–126.
5. Мелехов, И. С. Лесоведение : учебник для вузов / И. С. Мелехов. – 3-е изд., стер. – М. : МГУЛ, 2004. – 398 с.
6. Хох, А. Н. Автоматизированное рабочее место «DendroExp» как инструмент для рационализации проведения дендрохронологических экспертных исследований / А. Н. Хох, Д. Е. Кузменков // Криміналістичний вісник : наук.-практ. зб. / [голов. ред. В. В. Черней] / ДНДЕКЦ МВС України; НАВС. – К. : ПК «Типографія від «А» до «Я», 2017. – № 1 (27). – С. 133–140.
7. Barnett, J. Wood quality and its biological basis / J. Barnett, G. Jeronimidis. – Oxford : Blackwell, 2009. – 226 p.
8. Tree-ring standartization and growthtrend estimation / E. R. Cook [et al.] // Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publisher. – 1990. – P. 104–123.
9. Speer, J. H. Fundamentals of tree-ring research / J. H. Speer. – Т. : University of Arizona Press. – 2010. – 333 p.
10. Мельник, В. И. Основные результаты мониторинга изменения климата на территории Республики Беларусь / В. И. Мельник // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 6–7 апр. 2016 г. : в 2 ч. / УО «Брестск. гос. техн. ун-т» ; под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест, 2016. – Ч. 1. – С. 228–235.

Поступила в редакцию 28.01.2019

E-mail: 1ann1hoh@gmail.com; mycolog@tut.by

A. N. Khokh, V. B. Zvyagintsev

STUDYING OF THE ANATOMICAL PARAMETERS OF SCOTS PINE TREE LAYERS FOR IDENTIFICATION OF GROWING LOCATION

The article considers the issue of the influence of local geographical and climatic conditions of growing location on biometric characteristics of pine wood through the example of its microstructure. The subject of the research is mossy (*Pinetum pleuroziosum*) pine. The values of such indicators as the number of early and late tracheids, the dimensions of their cavities and wall thickness, the diameters of vertical resin channels were determined. The revealed formation peculiarities of anatomical structure of the annual layer of trees growing on 10 temporary trial plots in Mogilev region of the Republic of Belarus make it possible to conduct a differentiation of the investigated territories. It was concluded that the anatomical features are more sensitive to the change of environmental factors than the total width of the annual layer and, therefore, can be effectively used in conjunction with the classical tree-ring analysis in solving of problems related to the identification of wood growing location.

Keywords: place of growth, Scots pine, anatomical signs, environmental factors, tracheids, cluster analysis, tree layer width.