

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АНАТОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОДИЧНЫХ СЛОЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ РАЗНОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ*

А.Н. Хох¹, В.Б. Звягинцев²

¹Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь, Минск

²Белорусский государственный технологический университет, Минск

В статье рассматривается вопрос о влиянии места произрастания на формирование анатомической структуры годичных слоев древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Получены новые экспериментальные данные и показана значимость отдельных размерных характеристик ранних и поздних трахеид для установления района произрастания. Так, при переходе от северных к центральным и южным районам Беларуси в годичных слоях наблюдается увеличение количества ранних трахеид (в 1,4 раза), площади полости ранних и поздних трахеид (в 1,2 раза), но уменьшение количества поздних трахеид и толщины их клеточных стенок (в 1,1 раза). В целом, анализ варибельности 10-ти исследованных анатомических параметров показал, что территориальные различия определяются в первую очередь 3-мя из них: количество ранних трахеид, площадь полости ранних и площадь полости поздних трахеид. Показано, что сравнительный анализ полученных массивов результатов измерений может использоваться для дифференциации сосняков мшистых. При этом необходимым условием для правильной интерпретации полученных результатов является применение специальных методов математической статистики. Разработан метод классификации исследуемых объектов на основе линейного дискриминантного анализа, проведена оценка информативности переменных в предсказательной модели и качества разработанной процедуры классификации. Коэффициент результативности классификации для тестовой выборки в предложенной модели составил 93,33%

Ключевые слова. *Сосна обыкновенная, анатомические параметры, географическая широта, место произрастания, линейный дискриминантный анализ.*

* Работа выполнена в рамках задания 3.2.01 «Разработка новых подходов к судебно-экспертному исследованию объектов растительного происхождения» по государственной программе научных исследований «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Научное обеспечение безопасности человека, общества и государства» (№ госрегистрации 20160444).

Введение. В последнее время появляется все больше научных работ, посвященных детальному изучению анатомических параметров годичных слоев (далее – ГС) древесины хвойных. Это связано с тем, что информация, содержащаяся в клеточных структурах, значительно многообразнее, чем информация, заключенная в ГС на макроуровне. Наиболее часто в исследованиях рассматривается структура уже сформировавшихся ГС (Rossi et al., 2003; Muangsong et al., 2020), но существуют также и работы, связанные с изучением самого процесса формирования древесины и его зависимости от внешних условий (Wang et al., 2020; Cogrea-Díaz et al., 2020).

Мы полагаем, что такой подход также позволит расширить возможности дендрохронологического анализа с целью отождествления участка местности, на котором выросли срубленные деревья. На сегодняшний день такая информация практически не используется в судебно-экспертной практике.

Объектом исследования явилась сосна обыкновенная (*P. sylvestris*) – самая распространенная лесообразующая порода Беларуси, а потому наиболее подверженная незаконным рубкам и другим правонарушениям в сфере лесопользования.

С учетом доминирования в республике суходольных сосняков, их высокой продуктивностью, хозяйственной ценностью и лучшим качеством получаемых сортиментов, для отработки подходов диагностики места произрастания на основе анатомических параметров ГС были выбраны сосновые насаждения мшистого типа леса (*Pinetum pleurozium*).

Цель работы – провести дифференциацию сосны обыкновенной разного географического происхождения на основе количественной оценки вариаций отдельных анатомических параметров годичных слоев.

Материал и методика. В работе использован дендрохронологический материал (буровые керны) с 18 временных пробных площадей (далее – ВПП), заложенных во время полевых работ в 2017-2018 гг. на территории южных, северных и центральных регионов Беларуси. Определение состава и структуры сосновых насаждений на них проводилось с использованием общепринятых в геоботанике, лесоводстве и лесной таксации методов (Мелехов, 2004).

Буровые керны отбирались у 15-ти деревьев высших классов Крафта возрастным буром «Haglof» перпендикулярно продольной оси ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли (Шиятов и др., 2000).

Краткая лесоводственно-таксационная характеристика объектов исследования представлена в таблице 1.

Таблица 1

Таксационные показатели древостоев сосны обыкновенной

№№ ВПП	Координаты		ТУМ	Состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Полнота	
	Широта	Долгота						
Южные районы	1	51°34'12.0"N	23°38'46.2"E	A2	9С1Б+Д	120	II	0,5
	2	51°55'33.8"N	26°47'43.0"E	A2	10С	90	II	0,7
	3	52°22'51.7"N	26°38'13.1"E	A2	10С	90	II	0,7
	4	52°21'44.4"N	26°38'00.9"E	A2	9С1Б	121	II	0,6
	5	51°52'31.7"N	29°27'30.6"E	A2	10С	140	II	0,6
	6	52°07'13.2"N	30°44'16.5"E	A2	10С+Б	130	II	0,6
Центральные районы	7	53°53'42.2"N	24°27'15.1"E	A2	10Сед.Б	90	II	0,6
	8	53°23'48.0"N	25°06'39.2"E	A2	10Сед.Е,ОС,Б	100	I	0,5
	9	53°09'18.0"N	27°30'02.0"E	B2	10Сед.Б,ОС	100	I	0,7
	10	53°02'03.0"N	28°48'38.0"E	A2	10Сед.Б	120	II	0,7
	11	53°00'30.2"N	53°00'30.2"N	A2	10С	110	II	0,6
	12	53°21'38.6"N	31°08'40.1"E	A2	10С	90	II	0,6
Северные районы	13	55°43'12.8"N	27°00'09.1"E	B2	10С+Е	110	I	0,9
	14	55°48'03.1"N	27°47'43.5"E	A2	10С+Е	130	II	0,6
	15	55°51'51.0"N	28°23'20.0"E	A2	10С+Б	120	II	0,7
	16	55°57'03.0"N	28°38'53.0"E	A2	10С	90	II	0,5
	17	55°51'58.0"N	28°57'24.0"E	A2	10С	90	I	0,5
	18	55°51'08.2"N	29°54'21.1"E	A2	10С	120	II	0,6

Подготовка образцов древесины к измерениям морфолого-анатомических параметров состояла в размягчении буровых кернов путем их вываривания в кипятке в течение 15 мин., получении поперечных срезов толщиной не более 20 мкм с помощью санного микротомы Leica SM2010R с ручным управлением и закреплении полученных препаратов в глицерине.

Препараты срезов анализировались с помощью программы MCview (ЛОМО-Microsystems, РФ) в последних 20 ГС керна; размерные характеристики измерялись в 5 рядах клеток в каждом слое «методом сплошного измерения» с точностью ≤ 2 мкм. Средние показатели получали усреднением результатов измерений по годичным слоям каждого из исследованных деревьев на ВПП. Полученные данные в дальнейшем автоматически преобразовывались в сводную электронную таблицу формата .xlsx. Для разграничения ранних и поздних трахеид применяли «правило Морка», в соответствии с которым поздние трахеиды начинаются с той клетки, у которой радиальная толщина двойной клеточной стенки больше или равна полуширине люмена (Barnett, Jeronimidis, 2009).

Статистическая обработка материалов исследования проводилась с использованием статистических пакетов Microsoft Excel v.10.0, SPSS v.22.0 и The Unscrambler X v.10.4.1 (САМО, США). Применялись следующие методы: одномерная описательная статистика для каждого из

исследуемых параметров, однофакторный дисперсионный анализ ANOVA, линейный дискриминантный анализ (далее – LDA).

Результаты и обсуждение. Перед проведением сравнительного анализа количественных данных определяли вид распределения данных (W-тест Шапиро-Уилка, графический анализ данных). В результате установлено, что для всех исследованных анатомических параметров $p > 0,05$, а потому можно заключить, что анализируемые распределения не отличаются от нормального. Пример гистограммы распределения значений признака и ожидаемой нормальной кривой представлен на рисунке 1.

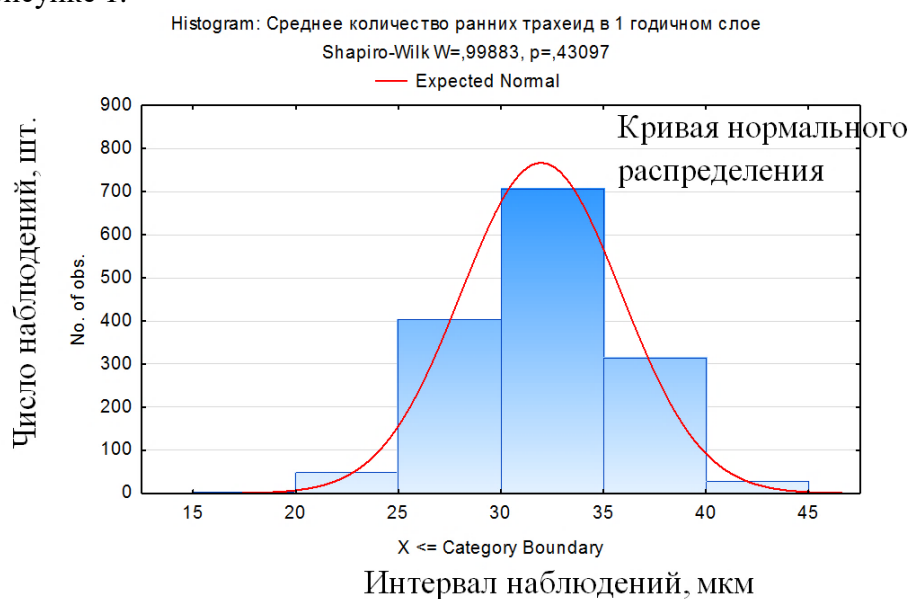


Рис. 1. Гистограмма распределения количества ранних трахеид в годичном слое

Однако для использования параметрического однофакторного дисперсионного анализа ANOVA недостаточно проверки лишь нормальности распределения в группах сравнения. Необходимо выполнение еще одного ограничительного условия – равенства генеральных дисперсий. Для 5 из 10 исследованных параметров p-value критерия Ливиня оказался $> 0,05$, т.е. для данных параметров дисперсии сравниваемых распределений значений статистически достоверно не различаются, что могло бы послужить основанием для сомнения в корректности применения ANOVA, поэтому нами также был рассчитан критерий Брауна-Форсайта. Отметим, что в нашем случае его результаты оказались аналогичны результатам однофакторного дисперсионного анализа.

Полученные нами данные отдельно для каждого из 3-х исследованных районов суммированы в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение значений анатомических параметров годичных слоев сосны обыкновенной в зависимости от места произрастания

Районы	Измеряемый параметр	M	SD	V%	ANOVA Знач. F	p- value	Статистика Ливиня	p- value	Статистика Брауна- Форсайта	p- value
Северные	N РТ, шт.	25,1	3,5	14	93,274	,000	7,508	,001	93,094	,000
Центральные		32,8	7,1	22						
Южные		34,8	5,1	15						
Северные	R РТ, мкм	32,5	4,7	15	6,150	,002	1,724	,180	6,149	,002
Центральные		33,3	6,3	19						
Южные		35,1	6,0	17						
Северные	W _R РТ, мкм	2,0	0,4	18	30,181	,000	5,676	,004	30,256	,000
Центральные		2,0	0,4	20						
Южные		2,4	0,3	11						
Северные	S _{кc} РТ, мкм ²	237,4	57,8	24	25,318	,000	14,084	,000	25,317	,000
Центральные		239,7	71,8	30						
Южные		279,4	56,0	20						
Северные	S _n РТ, мкм ²	763,7	138,3	18	11,274	,000	3,837	,023	11,273	,000
Центральные		786,7	195,4	25						
Южные		786,1	183,4	23						
Северные	N ПТ, шт.	21,4	2,7	13	1,326	,267	3,822	,023	1,325	,268
Центральные		19,1	2,6	14						
Южные		19,9	4,1	21						
Северные	R ПТ, мкм	21,7	3,9	17	2,360	,096	1,093	,337	2,360	,096
Центральные		19,9	3,9	20						
Южные		19,1	3,8	19						
Северные	W _R ПТ, мкм	4,4	0,7	17	1,782	,170	5,708	,004	1,786	,170
Центральные		4,1	0,7	18						
Южные		4	0,5	14						
Северные	S _{кc} ПТ, мкм ²	319,1	72,1	23	16,849	,000	7,843	,000	16,918	,000
Центральные		297,2	60,5	20						
Южные		348,9	73,1	21						
Северные	S _n ПТ, мкм ²	201,7	59,5	29	31,805	,000	,281	,755	31,824	,000
Центральные		228,4	54,2	24						
Южные		176,8	28,3	16						

Примечание. * жирным шрифтом выделены достоверные различия; N РТ – количество ранних трахеид в радиальном ряду годичного слоя; R РТ – радиальный размер ранней трахеиды; W_R РТ – толщина клеточной стенки ранней трахеиды; S_{кc} РТ – площадь клеточной стенки ранней трахеиды; S_n РТ – площадь полости ранней трахеиды; N ПТ – количество поздних трахеид в радиальном ряду годичного слоя; R ПТ – радиальный размер поздней трахеиды; W_R ПТ – толщина клеточной стенки поздней трахеиды; S_{кc} ПТ – площадь клеточной стенки поздней трахеиды; S_n ПТ – площадь полости поздней трахеиды; M – среднее значение; SD – среднеквадратичное отклонение параметра, V – коэффициент вариации.

Установлено, что наиболее изменчивыми параметрами являются площадь клеточной стенки ранних трахеид и площадь полости поздних трахеид. Коэффициент вариации для них составил 25 %. В свою очередь, радиальные размеры трахеид наименее подвержены изменениям количественных характеристик (коэффициент вариации составил 16 %).

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что статистически значимые различия были выявлены для следующих

анатомических параметров годичных слоев: количество ранних трахеид (N PT), радиальный размер ранних трахеид (R PT), толщина клеточной стенки ранних трахеиды (W_R PT), площадь клеточной стенки ранних (S_{kc} PT) и поздних (S_{kc} ПТ) трахеид, площадь полости ранних (S_p PT) и поздних (S_p ПТ); причем для 6 из 7 исследованных параметров уровень значимости составил $p < 0.001$.

В то же время, статистически значимых различий для количества поздних трахеид в радиальном ряду ГС (N ПТ), радиальных размеров поздних трахеид (R ПТ) и толщины клеточной стенки поздних трахеиды (W_R ПТ) в зависимости от географической широты выявлено не было.

Далее структура исследованных морфолого-анатомических параметров была проанализирована с помощью метода линейного дискриминантного анализа (рассматривалось предположение о нормальном разделении признаков объектов). Его основная идея заключалась в построении линейной функции, зависящей от известных параметров каждого из 3-х исследованных районов.

Для построения LDA-модели были сформированы 2 массива данных: обучающий массив включает 240 выборки данных с 10 переменными; тестовый массив состоит из 30 выборок.

На рисунке 2 показаны в координатах первых главных компонент результаты линейного дискриминантного анализа (характер дискриминации) для северных, центральных и южных районов Беларуси.

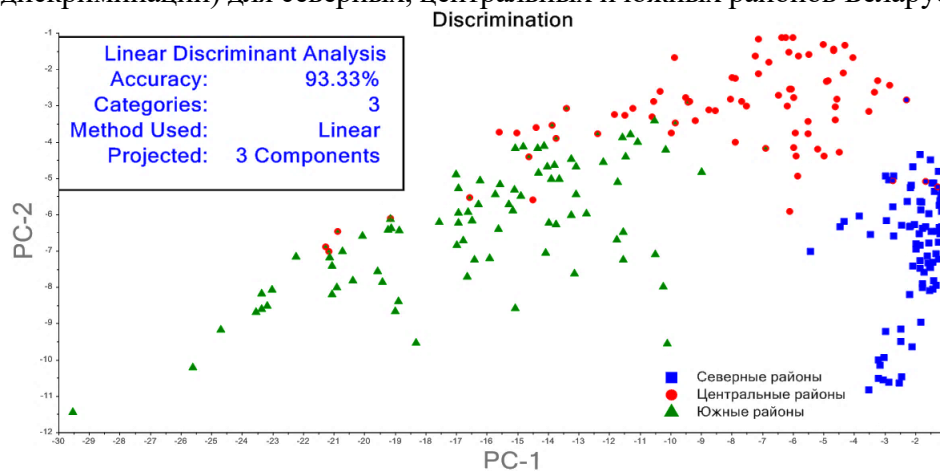


Рис. 2. Двумерное пространство (PC1, PC2) с тремя классами объектов

Для оценки качества классификационной модели рассчитывался процент истинных положительных результатов (далее TP), истинных отрицательных результатов (далее TN), ложных положительных результатов (далее FP) и ложных отрицательных результаты (далее FN) (Хох, Звягинцев, 2020). После чего по следующей формуле

рассчитывался коэффициент правильной классификации по следующей формуле:

$$A = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \times 100\%$$

Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели оценки качества LDA-модели

	Северные районы	Центральные районы	Южные районы	Итого
Северные районы	80	4	0	84
Центральные районы	0	64	0	64
Южные районы	0	12	80	92
	100	80	100	93,33

Таблица 4

Результаты LDA-классификации

Экзаменационная выборка	Коэффициенты линейных дискриминантов			Результат классификации
	Северные	Центральные районы	Южные	
Северные районы №1	-3,049	-5,176	-9,315	Северные районы
Северные районы №2	-3,243	-5,504	-9,617	Северные районы
Северные районы №3	-2,776	-4,984	-8,792	Северные районы
Северные районы №4	-1,855	-8,123	-20,433	Северные районы
Северные районы №5	-1,329	-5,871	-13,079	Северные районы
Северные районы №6	-1,216	-5,059	-13,614	Северные районы
Северные районы №7	-1,510	-5,735	-12,956	Северные районы
Северные районы №8	-2,788	-5,938	-11,429	Северные районы
Северные районы №9	-2,722	-4,944	-9,631	Северные районы
Северные районы №10	-2,056	-7,985	-18,522	Северные районы
Центральные районы	-5,419	-1,545	-7,282	Центральные районы
Центральные районы	-5,155	-1,602	-6,640	Центральные районы
Центральные районы	-14,005	-4,612	-10,752	Центральные районы
Центральные районы	-10,639	-2,551	-4,913	Центральные районы
Центральные районы	-8,265	-2,687	-9,930	Центральные районы
Центральные районы	-7,892	-2,644	-4,892	Центральные районы
Центральные районы	-4,793	-2,025	-9,353	Центральные районы
Центральные районы	-17,750	-5,352	-3,091	Южные районы
Центральные районы	-16,805	-4,398	-2,451	Южные районы
Центральные районы	-7,953	-1,876	-2,917	Центральные районы
Южные районы №1	-14,872	-4,345	-2,300	Южные районы
Южные районы №2	-11,067	-4,292	-1,906	Южные районы
Южные районы №3	-12,948	-5,449	-1,774	Южные районы
Южные районы №4	-13,762	-6,656	-2,003	Южные районы
Южные районы №5	-14,324	-5,343	-1,179	Южные районы
Южные районы №6	-11,147	-4,161	-1,887	Южные районы
Южные районы №7	-13,841	-4,452	-2,188	Южные районы
Южные районы №8	-20,444	-7,706	-2,276	Южные районы
Южные районы №9	-19,081	-6,726	-1,571	Южные районы
Южные районы №10	-15,274	-6,609	-2,400	Южные районы

Результаты проверки работоспособности модели в экзаменационной выборке показали 100%-ую специфичность, чувствительность и диагностическую ценность разработанной модели в северных и южных районах. В тоже время для центральных районов 20% наблюдений было классифицировано неверно и отнесено в подгруппу северных (5%) и южных (15%). Общий коэффициент корректности отнесения составил 93,33%.

На следующем этапе была проведена процедура валидации, т.е. проверка работоспособности полученной модели. В модель были включены 30 наблюдений (по 10 из каждого района), не вошедших в обучающую выборку. Общий коэффициент корректности отнесения также составил 93,33%. Результаты LDA-классификации экзаменационной выборки представлены в таблице 4.

Как можно видеть из таблицы 4 два образца из центральных районов были классифицированы неправильно и отнесены к южным.

Чтобы оценить относительный вклад отдельных анатомических параметров годичных слоев сосны обыкновенной на распределение исследованных объектов в пространстве и определения наиболее информативных из них был проведен анализ нагрузок на линейные дискриминанты R1, R2 и R3. Результаты приведены на рисунке 3.

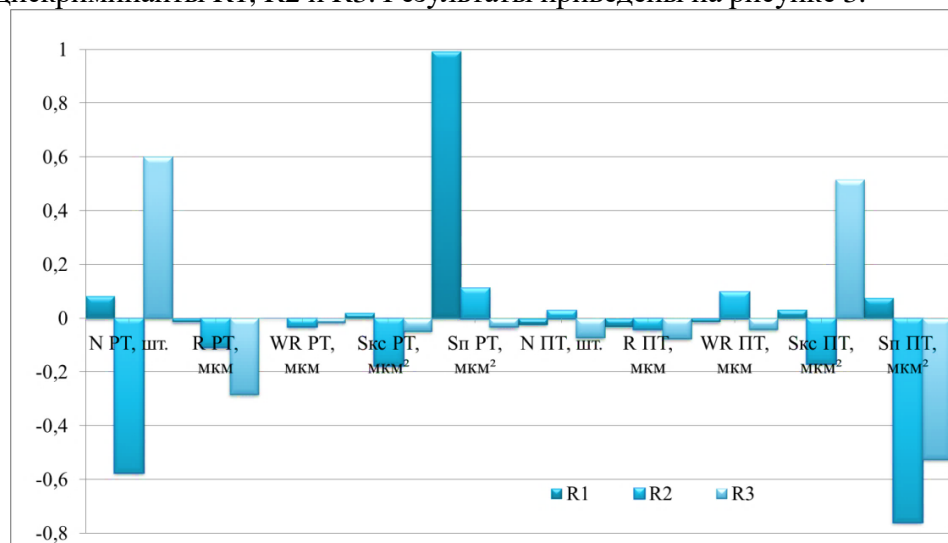


Рис. 3. График нагрузок

Установлено, что разделение ВПП №1-18 на группы обусловлено в первую очередь количеством ранних трахеид (N PT), а также площадью полостей ранних ($S_{п PT}$) и поздних ($S_{п ПТ}$) трахеид; т.е. именно они в большей зависят от географической широты.

Заключение. Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили выявить устойчивые тенденции изменчивости количества ранних трахеид, радиального размера и толщины клеточной стенки ранних трахеид, а также площади ранних и поздних трахеид и их полостей в зависимости от географической широты. Результаты работы свидетельствуют о том, что сосна обыкновенная из разных районов Беларуси достаточно четко отличается по комплексу анатомических параметров. Наибольший вклад в территориальные различия вносят количество ранних трахеид, а также площади полостей ранних и поздних трахеид. Получены достоверные оценки различий анатомических параметров годовых слоев *P. sylvestris* из трех исследованных районов. Анализ изменчивости анатомических характеристик подтвердил эврибионтность и высокую экологическую пластичность сосны обыкновенной.

Впервые на основе специальных методов математической статистики была проведена дифференциация сосны обыкновенной разного географического происхождения. В результате установлено, что объективную оценку полученным массивам результатов измерений анатомических параметров годовых слоев и достаточно высокую достоверность классификации позволяет дать применение линейного дискриминантного анализа.

Полагаем, что приведенные в работе сведения могут иметь практическое значение для сравнительных исследований древесины сосны в целях ориентировочного определения интересующего участка местности.

Список литературы

- Мелехов И. С. 2004. Лесоведение. М.: МГУЛ. 398 с.
- Хох А. Н., Звягинцев В. Б. 2020 Установление видовой принадлежности древесины хвойных пород с помощью спектроскопии в ближней инфракрасной области // Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы: сб. науч. тр. Т. 1. № 47. С. 161-168.
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазена В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. 2000. Методы дендрохронологии. Ч.1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методич. пособие. Красноярск: КрасГУ. 80 с.
- Barnett J., Jeronimidis G. Wood quality and its biological basis. Oxford : Blackwell, 2009. 226 p.
- Correa-Díaz A., Gomez-Guerrero A., Vargas-Hernández J. J., Rozenberg P., Horwath W. R. 2020. Long-term wood micro-density variation in alpine forests at central México and their spatial links with remotely sensed information // Forests. V. 11. №. 4. P. 452.
- Muangsong C., Pumijumnong N., Cai B., Buajan S., Lei G., Wang F., Payomrat P. 2020. Effect of changes in precipitation amounts and moisture sources on inter-and intra-

- annual stable oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of teak trees from northern Thailand // *Agricultural and Forest Meteorology*. V. 281. P. 1-12.
- Rossi S., Deslauriers A., Morin H. 2003. Application of the Gompertz equation for the study of xylem cell development // *Dendrochronologia*. V. 21. №1. P. 33-39.
- Wang L., Payette S., Bégin Y. 2020. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec // *Canadian Journal of Forest Research*. V. 32. №. 3. P. 477-486.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE ANATOMICAL PARAMETERS OF THE ANNUAL LAYERS OF THE SCOTS PINE OF DIFFERENT GEOGRAPHICAL ORIGIN

A.N. Khokh¹, V.B. Zviagintsev²

¹Scientific and Practical Centre of The State Forensic Examination Committee
of The Republic of Belarus, Minsk

²Belarusian State Technological University, Minsk

The article discusses the impact of the habitat on the formation of the anatomical structure of the annual layers of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. New experimental data have been obtained, as well as the significance of individual dimensional characteristics of early and late tracheids for establishing the habitat has been shown. Thus, when moving from northern to central and southern regions, an increase in the number of early tracheids (1,4 times), the cavity area of early and late tracheids (1,2 times), but a decrease in the number of late tracheids and the thickness of their cell walls (1,1 times) are observed in annual rings. In general, the analysis of the variability of 10 studied anatomical parameters has shown that primarily three of them determine territorial differences: the number of early tracheids, the area of the cavity of the early tracheids and the area of the cavity of the late tracheids. It is shown that a comparative analysis of the obtained arrays of measurement results can be used to differentiate mossy pine forests. In this case, a necessary condition for the correct interpretation of the results obtained is the use of special methods of mathematical statistics. A method for classifying the studied objects based on linear discriminant analysis was developed. The information capacity of variables in the predictive model and the quality of the developed classification procedure were assessed. The efficiency coefficient of the classification for the test sample in the proposed model was 93,33%.

Keywords. *Scots pine, anatomical parameters, geographical latitude, place of growth, linear discriminant analysis.*

Об авторах:

ХОХ Анна Николаевна – заведующий лабораторией исследования материалов, веществ и изделий, Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь, 220114, Минск, ул. Филимонова, д. 25; e-mail: 1ann1hoh@gmail.com.

ЗВЯГИНЦЕВ Вячеслав Борисович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения, Белорусский государственный технологический университет, 220006, Минск, ул. Свердлова, д. 13а; e-mail: mycolog@tut.by.

Хох А.Н. Сравнительная оценка анатомических параметров годичных слоев сосны обыкновенной разного географического происхождения / А.Н. Хох, В.Б. Звягинцев // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2022. № 2(66). С. 111-121.