

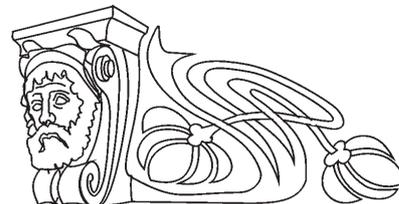


Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 47–56
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 47–56
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-47-56>

Научная статья
УДК 581.5+574.24+630.181

Особенности элементного состава древесины сосны обыкновенной в зависимости от условий местопроизрастания и фазы вегетации



А. Н. Хох¹✉, В. Б. Звягинцев²

¹Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь, Беларусь, 22011, г. Минск, ул. Филимонова, д. 25

²Белорусский государственный технологический университет, Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13А

Хох Анна Николаевна, заведующий лабораторией исследования материалов, веществ и изделий научного отдела технических, криминалистических и специальных исследований, 1ann1hoh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4633-0163>

Звягинцев Вячеслав Борисович, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой лесозащиты и древесиноведения, mycolog@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-2530-4655>

Аннотация. Формирование элементного состава растений является динамическим процессом, на который влияет большое количество одновременно действующих генетических и экологических факторов, и их приоритетность меняется в зависимости от условий и состояния окружающей среды. Цель работы заключалась в изучении особенностей накопления 8 химических элементов в древесине сосны обыкновенной под влиянием сезонной и экологической изменчивости. Объектами исследования являлись старовозрастные древостои, произрастающие на территории Березинского биосферного заповедника. Всего в разных типах леса было заложено 7 временных пробных площадей. Количественное содержание элементов определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного спектрометра ElvaX. Общей чертой для всех изученных типов леса в начале и к концу вегетационного периода является увеличение концентрации Mn и Cu в древесине. По содержанию данных элементов можно судить о сезонных различиях в исследуемых образцах для всех участков леса с условиями роста, близкими к изученным типам леса. Независимо от сезона отбора образцов при переходе от сухих к полувлажным и влажным условиям роста в древесине наблюдается уменьшение концентрации Ca и K и увеличение концентрации Sr и Zn. Дополнительными дифференцирующими элементами при исследовании экологической изменчивости древесины являются Rb, Sr и Pb. Полученные данные могут использоваться как справочные сведения в исследованиях, направленных на установление групповой принадлежности в криминалистических исследованиях при решении экспертных задач о времени и месте заготовки древесины сосны обыкновенной

Ключевые слова: сосна обыкновенная, древесина, элементный состав, рентгенофлуоресцентный анализ, экологические факторы, вегетационный период

Благодарности: 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).

Для цитирования: Хох А. Н., Звягинцев В. Б. Особенности элементного состава древесины сосны обыкновенной в зависимости от условий местопроизрастания и фазы вегетации // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-47-56>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The characteristics of the elemental composition of the scots pine wood in accordance with the conditions of a growing site and a vegetation phase

A. N. Khokh¹✉, V. B. Zviagintsev²

¹Scientific and Practical Centre of The State Forensic Examination Committee of The Republic of Belarus, 25 Philimonova St., Minsk 220114, Belarus

²Belarusian State Technological University, 13A Sverdlova St., Minsk 220006, Belarus

Anna N. Khokh, 1ann1hoh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4633-0163>

Vyacheslav B. Zviagintsev, mycolog@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-2530-4655>



Abstract. The formation of the elemental composition of plants is a dynamic process, which is affected by a large number of concurrent genetic and environmental factors, and their significance varies according to the conditions and the state of the environment. The goal of the work was to study the characteristics of the accumulation of 8 chemical elements in Scots pine wood under the influence of seasonal and ecological variability. The objects of our research were old-growth forest stands on the territory of the Berezinsky Biosphere Reserve. In total, 7 temporary sample plots were laid in different types of forest. The quantitative content of elements was determined using an energy-dispersive X-ray fluorescent spectrometer ElvaX. Research indicated that a common feature for all the studied types of forest by the end of a vegetation season is an increase in the concentration of Mn and Cu in wood. Consequently, they give an indication of the seasonal differences in the wood samples for all forest plots with growing conditions close to the studied forest types. Regardless of sampling season, a decrease in the concentration of Ca and K and an increase in the concentration of Sr and Zn are observed in wood during the transition from dry to semi-moist and moist growing conditions. The additional differentiating elements in the study of the ecological variability of wood are the following: Rb, Sr and Pb. The obtained data can be used as reference or indicative information in studies aimed at solving problems to explore opportunities for narrowing the group affiliation while clarifying the temporal parameters of the objects and their attitude to a particular plot

Keywords: Scots Pine, microelement composition, X-ray fluorescence analysis, environmental factors, vegetation period

Acknowledgements: This work was carried out as part of the task 3.2.01 "The development of new approaches to the forensic investigation of objects of vegetable origin" under the state program of scientific researches, "The Computer Science, Space and Security", the subprogram "The scientific support of forensic activity and protection from emergencies" (State registration number 20160444).

For citation: Khokh A. N., Zviagintsev V. B. The characteristics of the elemental composition of the scots pine wood in accordance with the conditions of a growing site and a vegetation phase. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 47–56. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-47-56>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Древесные растения являются важнейшим звеном биогеохимического круговорота веществ в природе. Анализ зарубежной и отечественной литературы свидетельствует о том, что вопросы, связанные с содержанием макро- и микроэлементов в древесине и их ролью в функционировании растительных организмов, достаточно широко изучены, однако у специалистов по этому поводу нет единого мнения. Ряд авторов считают, что все элементы участвуют в жизненных процессах [1, 2], другие указывают на то, что для нормальной жизнедеятельности растений необходимы лишь те из них, функции которых незаменимы [3, 4]. Некоторые исследователи полагают, что каждый вид растения, в независимости от условий произрастания, характеризуется относительно постоянным количеством элементов [5, 6]; по мнению других – их содержание является динамическим процессом, на который влияет большое количество одновременно действующих генетических и экологических факторов, и их приоритетность меняется в зависимости от состояния окружающей среды [7, 8]. Большое количество работ посвящены изучению связи элементного состава древесины с уровнем загрязнения окружающей среды [9–11], в меньшей степени изучены вопросы, связанные с вариационностью химического состава растений, определяемой условиями биогеоценозов и фазой вегетации [12–14].

В лесах Республики Беларусь самой распространенной лесообразующей древесной породой является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Сосна – это эвритоп с очень широким географическим и экологическим ареалом. Благодаря низкой

требовательности к богатству и влажности почвы леса этой формации занимают широкий эдафический ареал и способны формировать сомкнутые насаждения в условиях, экстремальных для других лесообразующих пород, благодаря чему сосняки характеризуются почти равномерным распределением по всей территории Беларуси [15].

Цель данного исследования заключалась в проведении сравнительного анализа содержания ряда элементов в древесине сосны из разных типов леса в зависимости от условий обитания (биогеоценоза) и фазы вегетации деревьев. Наша рабочая гипотеза заключается в том, что изменчивость элементного состава растений определяется богатством почв и способностью усвоения микроэлементов растениями, напрямую зависящей от гидрологического режима в месте произрастания.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись хвойные фитоценозы сосны обыкновенной, произрастающие на территории государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник» (54°41,336' с.ш., 28°18,790' в.д.). Минимальное антропогенное воздействие и разнообразие типов леса делают эту территорию наиболее подходящей для проведения исследований экологической направленности.

Закладка временных пробных площадей (далее – ВПП) проводилась с учетом фитоценотической типичности (статистической однородности) насаждения в соответствии с принятыми в лесной таксации методикам [16]. Всего было заложено 7 ВПП в следующих типах леса: вересковом (*Pinetum cladinosum*), мшистом (*Pinetum*



pleurozium), орляковом (*Pinetum pteridiosum*), кисличном (*Pinetum oxalidosum*), долгомошном (*Pinetum polytrichosum*), багульниковом (*Pinetum ledosum*) и сфагновом (*Pinetum sphagnosum*). У всех деревьев на пробной площади измеряли диаметр стволов на высоте 1.3 м и общую высоту. Каждому дереву присваивался класс Крафта.

Схема расположения объектов исследования приведена на рис. 1.

Краткая характеристика исследованных древостоев приведена в табл. 1.

На каждой пробной площади у 20 деревьев возрастным буром «Haglof» с противоположных сторон перпендикулярно продольной оси ствола на высоте 1.0 – 1.3 м от поверхности земли отбирались буровые керны (по 2 с одного дерева): один – в конце апреля, второй – в начале сентября, т.е. ориентировочно отбор образцов приурочен к началу и к концу вегетационного периода развития деревьев. Всего в совокупности у 140 деревьев отобрано 280 кернов.

Чтобы избежать загрязнения древесины металлами, из которых изготовлен бур (для производства буров используется закаленная сталь, содержащая большие количества хрома, примеси никеля и др. цветных металлов), наружная поверхность керна срезалась ножом с керамическим лезвием и зачищалась с помощью гравера с насадкой из карбида вольфрама.



Рис. 1. Расположение объектов исследования
Fig. 1. The location of research object

Таблица 1 / Table 1

Таксационные показатели древостоев сосны обыкновенной на временных пробных площадях ($M_x \pm m_x$)
Inventory data of Scots pine stands on temporary sample plots ($M_x \pm m_x$)

№ ВПП / No. temporary sample plots	Лесничество / Forestry	Тип леса / Forest type	Средний диаметр, см / Average-diameter, cm	Средняя высота, м / Average height, m	ТУМ / SPT	Состав древостоя / Stand composition	Средний возраст, лет / Average age, year	Класс бонитета / Quality class
1	Домжерицкое / Domzheritskoe	<i>P. cladinosum</i>	28.0±0.9	20.1±0.7	A2	10C+Б/10Pn+B	90	II
2	Крайцевское / Kraitsevskoe	<i>P. pleurozium</i>	26.0±0.8	23.9±0.7	A2	10C/10Pn	105	I
3	Березинское / Berezinskoe	<i>P. pteridiosum</i>	27.5±0.8	26.0±0.8	B2	10C+E, Б/10Pn+P,B	120	I
4	Березинское / Berezinskoe	<i>P. oxalidosum</i>	40.5±1.4	34.0±1.2	C2	10C+E, Б/10Pn+P,B type	120	I
5	Домжерицкое / Domzheritskoe	<i>P. polytrichosum</i>	28.2±0.8	22.1±0.7	A4	10C+E, Б/10Pn+P,B	110	II
6	Домжерицкое / Domzheritskoe	<i>P. ledosum</i>	20.0±0.7	17.5±0.6	A5	10C+Б/10Pn+B	95	V
7	Домжерицкое / Domzheritskoe	<i>P. sphagnosum</i>	13.5±0.6	12.7±0.4	A5	10C/10Pn	120	V6

Примечание. M_x – среднее арифметическое значение; m_x – ошибка среднего; ТУМ – тип условий местопроизрастания.

Note. M_x – the arithmetic mean; m_x – the standard error of the mean; SPC – the site productivity type.



Впоследствии годичные слои 20 последних лет кернов измельчались до мелкодисперсного состояния, отбиралась навеска массой 2–3 г, которая помещалась в фарфоровый тигель и проводилось озоление путем прокаливания в муфельной печи при температуре 600°C в течение 4 часов. Далее зольные остатки перетирались в агатовой ступке, после чего на специальной пресс-форме из карбида вольфрама формировались «таблетки» диаметром 13 мм, толщиной около 1 мм для проведения измерений. Такой выбор годичных слоев был обусловлен тем, что они, как правило, относятся к заболонной части ствола дерева, которая транспортирует воду и активно участвует в росте и развитии древесного растения, в то время как ядровая древесина, по сути, находится в законсервированном состоянии и не участвует в активном текущем метаболизме дерева [17].

Определение содержания ряда элементов проводилось на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре СЕР-01 с родиевой (Rh) рентгеновской трубкой (ElvaX, Украина).

Для каждой пробы проводились 2 параллельных измерения интенсивности характеристического излучения и пика обратного рассеивания. Спектрограммы обрабатывались в программе «Elvatech MCA Software». Все операции расчетов при измерениях проводились в автоматическом режиме. Результаты измерений массовой доли химических элементов в пробах и их статистические погрешности экспортировались в файл формата .txt и сохранялись.

Статистическая обработка материалов исследования проводилась с использованием статистических пакетов Microsoft Excel v.10.0, SPSS v.20.0 и The Unscrambler X v.10.4.1. Полученные данные обрабатывались с помощью непараметрических методов (из-за малого объема выборок, характеризующихся разными законами распределения). При сравнении содержания элементов весной и осенью в пределах одной пробной площади использовался W-критерий Вилкоксона, а при сравнении пробных площадей между собой – H-критерий дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса. Различия считались достоверными при $p < 0.05$. Для оценки взаимосвязей количественных различий в содержании микроэлементов с типом местообитания применялся метод главных компонент (*principal component analysis* – PCA).

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены усредненные данные о содержании элементов в древесине сосны, а также коэффициенты вариации (CV, %), рассчи-

танные с учетом количественных измерений элементного состава древесины у всех 20 деревьев на каждой из семи пробных площадей в весенний и осенний периоды вегетации.

Рассчитанные из данных в табл. 2 средние коэффициенты вариации исследуемых элементов в 14 выборках (7 для весны и 7 для осени) для каждой ВПП показывают, что особенно велика индивидуальная изменчивость рубидия, меди, кальция и марганца – 32.90, 29.34, 23.57 и 23.53% соответственно. В наименьшей степени индивидуальная изменчивость выражена для цинка – 16.18% и калия – 17.74%. Принято считать, что, если значение коэффициента вариации менее 33%, то совокупность данных является однородной, если более 33%, то – неоднородной [18]. В целом, чем меньше значение коэффициента вариации, тем однороднее совокупность по изучаемому признаку и типичнее средняя. Из данного критерия следует, что физиологическая реакция всех 20 деревьев, отобранных на каждой из ВПП, выглядит синхронизированной и выровненной (коэффициенты вариации < 33%). Тем не менее, анализируя весь комплекс исследованных признаков (т.е. всю совокупность элементов), можно оценить данные в экологическом отношении, т.е. определить взаимосвязи вариации микроэлементов с типом местообитания дерева.

Также полученные данные позволяют рассмотреть уровень сезонной изменчивости, представляющей собой одну из разновидностей временной изменчивости для многолетних растений. По нашим данным, с учетом средних значений содержания элементов в древесине в начале и к концу вегетационного периода видно, что для всех исследованных типов леса отмечается уменьшение содержания в древесине меди примерно в 1.4 раза, увеличение содержания марганца – в 1.2 раза. Для остальных элементов однозначные закономерности сезонной изменчивости выявлены не были.

Экологическая изменчивость, определяемая биогеоценотическими условиями, в проводимом исследовании изучалась отдельно для весеннего и осеннего периодов. Данные табл. 2 свидетельствуют, что критерий Краскела – Уоллиса статистически значим для всех 8 исследованных элементов ($p < 0.05$), причем для 13 из 14 полученных значений уровень значимости составил $p < 0.001$.

Многомерные массивы стандартизированных данных для каждой ВПП и всех исследованных элементов (стандартизация нужна для того, чтобы размерность данных и их варибельность не влияла на результаты анализа) были



Таблица 2 / Table 2

Показатели изменчивости элементного состава древесины
The indicators of the elemental composition of the wood

Элемент, мг/кг / Element, mg / kg	ВПП №1 / TSP №1		ВПП №2 / TSP №2		ВПП №3 / TSP №3		ВПП №4 / TSP №4		ВПП №5 / TSP №5		ВПП №6 / TSP №6		ВПП №7 / TSP №7		p-value (ЭИ, осень) / (EI autumn)
	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	
Ca	M_x 665.7	735.3	649.8	660.2	729.5	701.3	517.9	536.5	642.6	662.6	493.0	502.9	253.3	277.9	2.4×10^{-10}
	CV (%)	23.0	23.4	17.4	23.6	23.8	26.8	21.7	25.0	18.2	23.9	21.6	24.1	23.5	9.8×10^{-11}
	p-value (СИ)	0.06	0.33		0.15		0.35		0.41		0.43		0.10		
Cu	M_x	2.4	2.4	3	2.4	3.1	1.5	2.6	2.4	3.1	2.3	3.0	2.0	3.2	
	CV (%)	26.7	27.4	29.9	27.1	26	24.6	32.1	36.7	24.6	32.4	35.1	28.9	32.1	0.09
	p-value (СИ)	0.06	0.006		0.004		0.05		0.02		0.005		0.0002		
K	M_x	670.8	652.0	728.7	676.1	648.1	620.4	682.1	496.1	462.6	485.1	480.6	305.9	275.1	1.5×10^{-11}
	CV (%)	18.6	15.3	19.1	17.9	17.1	17.4	15.6	18.9	14.0	12.5	13.4	27.3	27.4	
	p-value (СИ)	0.38	0.11		0.38		0.39		0.04		0.37		0.09		
Mn	M_x	29.8	40.4	47.0	57.2	67.9	77.0	64.9	77.2	55.5	54.6	60.5	32.9	44.3	
	CV (%)	23.6	17.9	27.9	22.3	22.9	24.3	24.8	17.0	18.3	18.9	25.8	35.9	30.1	1.1×10^{-12}
	p-value (СИ)	5.4×10^{-5}	0.01		0.04		0.01		0.05		0.04		0.01		
Pb	M_x	-	-	0.7	0.8	-	-	0.6	0.7	0.8	0.9	0.8	2.3	2.1	
	CV (%)	-	-	37.2	36.1	-	-	34.8	28.0	16.3	14.8	15.8	16.1	15.7	2.9×10^{-11}
	p-value (СИ)	-	0.19		-		0.08		0.17		0.27		0.09		
Rb	M_x	-	-	0.6	0.7	-	-	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	2.1	2.3	
	CV (%)	-	-	31.0	37.7	-	-	32.6	33.3	30.3	30.3	33.5	33.8	34.4	4.8×10^{-8}
	p-value (СИ)	-	-		-		0.09		0.04		-				
Sr	M_x	1.1	1.1	1.6	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.9	1.8	3.8	3.0	
	CV (%)	12.1	14.2	14.3	16.7	15.6	16.7	20.6	18.9	31.5	20.8	19.0	27.7	26.0	1.3×10^{-13}
	p-value (СИ)	0.48	0.05		0.18		0.33		0.48		0.23		0.01		
Zn	M_x	4.2	4.8	10.9	10.7	10.6	10.8	9.8	9.7	9.4	10.8	11.3	18.2	19.3	
	CV (%)	13.7	17.0	13.8	11.2	16.3	14.3	15.9	18.4	26.6	15.2	12.5	15.9	15.8	2.1×10^{-20}
	p-value (СИ)	0.06	0.01		0.33		0.40		0.31		0.19		0.05		

Примечание. M_x – the arithmetic mean; СИ – сезонная изменчивость; ЭИ – экологическая изменчивость.
Note. M_x – the arithmetic mean; SI – the seasonal variability; EI – the ecological variability.



проанализированы с помощью метода главных компонент *PCA* (*principal component analysis*). *PCA* выполняет простое геометрическое представление объектов и переменных в пространстве меньшей размерности. Полученные результаты представлены на графиках *PCA*-счетов: для начала вегетационного периода (апрель, рис. 2) и для окончания (сентябрь, рис. 3). Для весенне-

го периода первая главная компонента описывает 81% общей дисперсии, для осеннего – 90%.

В результате установлено, что как весной, так и осенью деревья с ВПП № 1–7 формируют четыре обособленных кластера. В обоих случаях (весной и осенью) индивидуальные кластеры формируют деревья из вересковых (ВПП № 1) и сфагновых (ВПП № 7) типов леса,

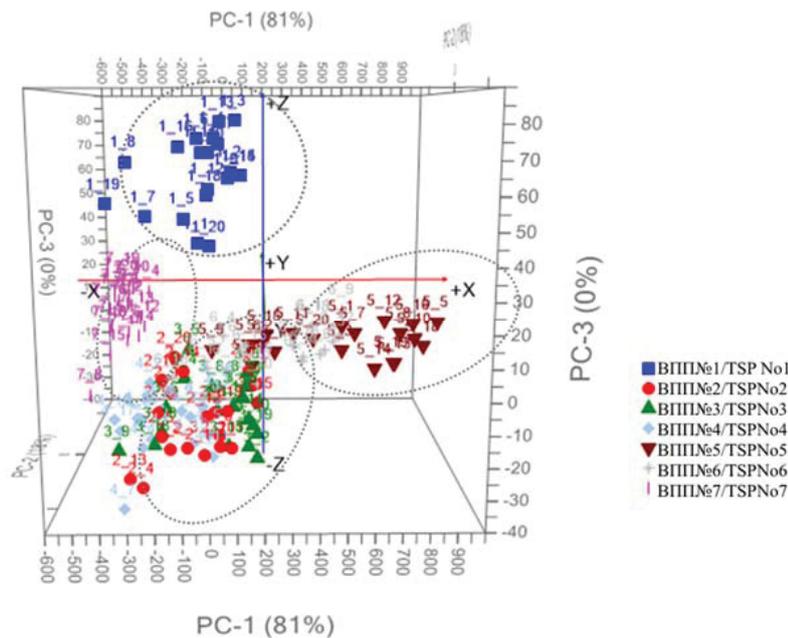


Рис. 2. График *PCA*-счетов для исследованных ВПП – весна (цвет online)
Fig. 2. The *PCA* scores for surveyed plots – spring (color online)

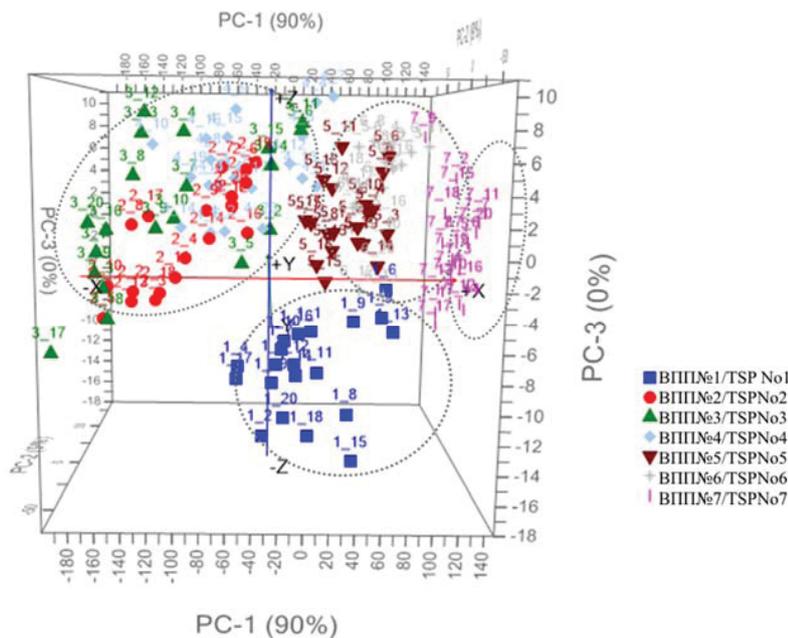


Рис. 3. График *PCA*-счетов для исследованных образцов – осень (цвет online)
Fig. 3. The *PCA* scores for surveyed plots – autumn (color online)



в один кластер попадают сосны из долгомошного (ВПП №5) и багульникового (ВПП №6) лесов, а деревья из мшистых, орляковых и кисличных сосняков по исследованным параметрам не различаются и образуют единый четвертый кластер (ВПП № 2–4 соответственно). Таким образом, анализ совокупности сведений об элементном составе древесины выявляет некоторые взаимосвязи содержания элементов с особенностями фитоценозов, что может быть использовано для отождествления участка местности, на котором выросли растения (установление источника происхождения растений по типу леса).

Для оценки степени влияния вариабельности каждого элемента на распределение деревьев по ВПП в пространстве главных компонент и опре-

деления наиболее информативных параметров проведен анализ нагрузок на первую и вторую главные компоненты. Результаты приведены на рис. 4 (весна) и рис. 5 (осень) в виде графиков (далее – ГК).

Анализ изменчивости содержания элементов на ГК-1 и ГК-2 показал, что для весеннего периода наиболее информативными (вариабельными) являются три элемента (Ca, K, и Rb) из 8 изученных; вариабельность их содержания в большей степени отвечает за разделение всех ВПП на кластеры. Для осеннего периода наибольшее значение имеет вариабельность Ca, K и Zn.

Полученные данные свидетельствуют о том, что экологическая изменчивость содержания ряда элементов в древесине сосны варьируется

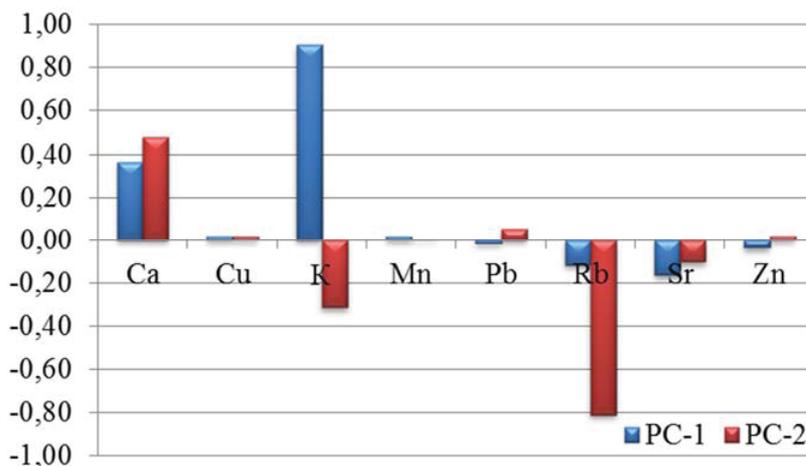


Рис. 4. График нагрузок на первую и вторую главные компоненты (весна) (цвет online)

Fig. 4. The load plot for the first and second main components (spring) (color online)

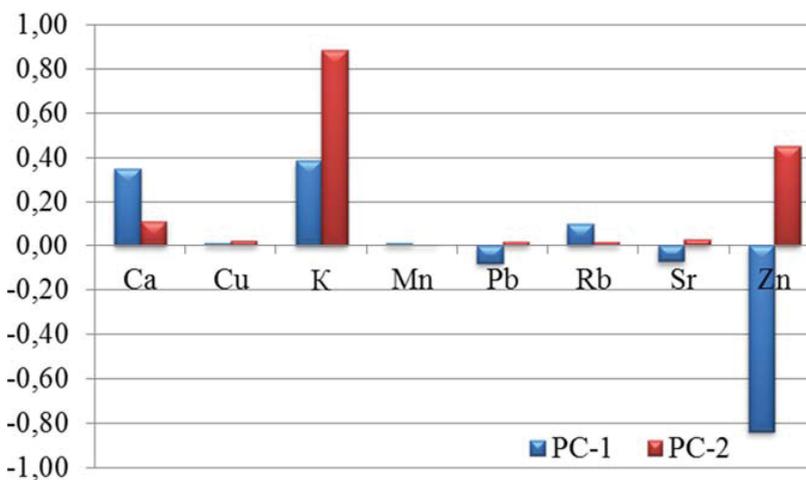


Рис. 5. График нагрузок на первую и вторую главные компоненты (осень) (цвет online)

Fig. 5. The load plot for the first and second main components (autumn) (color online)



в широких пределах. Значимость данных различий для 7 элементов подтверждается статистическими расчетами. Таким образом, помимо общеклиматических факторов, конкретные биогеоценотические условия произрастания, в том числе почвенно-гидрологические, существенно влияют на биохимические процессы, протекающие в растениях, что находит отражение и в элементном составе, различия которого могут быть значительными даже в пределах недалеко расположенных участков.

Исследованные в данной работе опытные объекты описывают практически весь спектр естественных сосновых лесов, встречающихся на территории Беларуси (за исключением сосняков лишайниковых). В рядах влажности и богатства почв все пробные площади расположены в пределах треугольника, в вершинах которого лежат сосняк вересковый (бедные сухие почвы), сосняк сфагновый (верховые болота с избыточным увлажнением) и сосняк кисличный (богатые почвы оптимального увлажнения).

Следует отметить, что в методическом отношении выводы об экологически обусловленной изменчивости элементного состава растений могут считаться достоверными лишь в том случае, если доказано, что установленные различия превышают те, которые могут быть вызваны сезонной изменчивостью. В связи с этим изучение сезонной изменчивости элементного состава древесины имеет важное научное и практическое значение.

В наших исследованиях сравнение сезонной и экологической изменчивости элементного состава древесины сосны по всем исследуемым элементам, за исключением бора и магния, показало четкую прослеживаемую зависимость: экологическая изменчивость больше сезонной (см. значения *p*-value в табл. 2).

В научной литературе имеются сведения о том, что изменения в сезонном характере распределения ряда элементов в хвойных растениях связаны с прохождением ими определенных фенологических фаз, а активность работы ассимиляционного аппарата во многом определяется присутствием в его структурных компонентах элементов минерального питания [19, 20].

В целом рассмотрение экологической изменчивости состава древесины сосны с учетом условий увлажнения при постепенном переходе от сухих к свежим и влажным условиям роста выявляет определенную тенденцию изменения в содержании элементов. Так, в условиях возростаания влажности наблюдается уменьшение содержания Са и К, что может быть следствием

бедности питательного субстрата либо невозможности усвоения элементов корнями вследствие застойного увлажнения на болоте. Нашими исследованиями показано, что параллельно уменьшению содержания Са и К происходит довольно резкое увеличение содержания цинка. В весенних и осенних образцах наивысший уровень цинка отмечается в древесине сосен, произрастающих в условиях застойного увлажнения, что, вероятно, можно объяснить ролью этого элемента в выработке устойчивости деревьев к грибным заболеваниям [21].

Таким образом, на основании проведенного анализа вариабельности содержания элементов в древесине методом главных компонент среди временных пробных площадей № 1–7 выявлены 4 однородные группы, одинаковые как в весенний, так и в осенний период. Ранее нами проведен сравнительный анализ древесно-кольцевых хронологий [22] в аналогичных выборках сосны обыкновенной с добавлением 8-й группы – сосняка лишайникового, который выявил дифференциацию сосняков на 3 группы:

1) группа 1 – сосняки, произрастающие на почвах неустойчивого и нормального увлажнения (сосняки лишайниковые, брусничные, вересковые, мшистые, орляковые, кисличные и свежие черничные);

2) группа 2 – сосняки, произрастающие на почвах избыточного увлажнения (сосняки багульниковые и долгомошные);

3) группа 3 – сосняки, произрастающие на верховых болотах (осоково-сфагновые и сфагновые).

Установленная методом древесно-кольцевых хронологий дифференциация сосняков во многом схожа по составу с кластерами, выявленными анализом содержания элементов в древесине методом главных компонент (см. рис. 4, 5). Отличия заключаются лишь в том, что по результатам данного исследования сосняк вересковый выделился в отдельный кластер. Такое совпадение результатов, полученных двумя различными методами, не случайно, поскольку два из трех наиболее вариабельных элементов в данном исследовании – Са и К – представляют составные части минерального питания растения (макроэлементы), которые во многом определяют развитие древесно-кольцевых структур древесины сосны.

По результатам исследования содержания различных элементов в древесине сосны показана связь их вариабельности с типом местообитания, что позволяет использовать химический состав ксилемы сосны обыкновенной как индикатор условий произрастания вида.



Выводы

Выполненные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В каждом изученном типе леса четко просматриваются особенности накопления отдельных элементов в древесине сосны.

2. На всех исследуемых временных пробных площадях подтверждена достоверность сезонных изменений содержания марганца и меди в древесине. Таким образом, данные элементы являются основными сезонными определяющими (дифференцирующими) элементами. Количественное определение содержания марганца и меди в древесине сосны позволяет судить о сезонных различиях в исследуемых образцах для всех участков леса с условиями роста, близкими к изученным типам леса.

3. Вне зависимости от фазы вегетации при переходе от сухих к свежим и влажным условиям роста в древесине сосны обыкновенной выявляется уменьшение концентрации Са (в 2.6 раза), К (в 2.3 раза), а также увеличение концентрации Sr (в 3 раза) и Zn (в 3.5 раза). Полученные данные являются важными отличительными признаками для сходных лесорастительных условий в рассматриваемом регионе.

4. Выявленные закономерности накопления элементов древесиной сосны могут иметь практическое значение в судебно-экспертной практике в случае проведения сравнительных исследований в целях установления места произрастания (фитоценоза, типа леса) деревьев или их дифференциации по данному критерию.

Список литературы

1. Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
2. Raskin I., Kumar P. N., Dushenkov S., Salt D. E. Bioconcentration of heavy metals by plants // *Current Opinion in Biotechnology*. 1994. Vol. 5, № 3. P. 285–290.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. М. : Мир, 1989. 439 с.
4. Nakabayashi R., Saito K. Integrated metabolomics for abiotic stress responses in plants // *Current Opinion in Plant Biology*. 2015. Vol. 24. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.01.003>
5. Towett E. K., Shepherd K. D., Lee Drake B. Plant elemental composition and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectroscopy: Quantification under different analytical parameters // *X-Ray Spectrometry*. 2016. Vol. 45, № 2. P. 117–124. <https://doi.org/10.1002/xrs.2678>
6. Kumar V., Sharma A., Bhardwaj R., Thukral A. K. Elemental composition of plants and multivariate analysis // *National Academy Science Letters*. 2019. Vol. 42, № 1. P. 45–50. <https://doi.org/10.1007/s40009-018-0715-1>
7. Han W. X., Fang J. Y., Reich P.B., Ian Woodward F., Wang, Z. H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China // *Ecology Letters*. 2011. Vol. 14, № 8. P. 788–796. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01641.x>
8. Ji H., Wen J., Du B., Sun N., Berg B., Liu C. Comparison of the nutrient resorption stoichiometry of *Quercus variabilis* Blume growing in two sites contrasting in soil phosphorus content // *Annals of Forest Science*. 2018. Vol. 75, № 2. P. 59. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0727-5>
9. Linnik V. G., Minkina T. M., Bauer T. V., Saveliev A. A., Mandzhiyeva S. S. Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals pollution around coal-fired power station // *Environmental Geochemistry and Health*. 2019. Vol. 42, № 2. P. 4087–4100. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00361-z>
10. Turkyilmaz A., Sevik H., Isinkaralar K., Cetin M. Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, № 5. P. 5122–5130. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3962-2>
11. Goyal D., Yadav A., Prasad M., Singh T. B., Shrivastav P., Ali A., Mishra S. Effect of Heavy Metals on Plant Growth: An Overview // *Contaminants in Agriculture*. Cham. : Springer, 2020. P. 79–101. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27583.87204>
12. Сухарева Т. А. Сезонная динамика химического состава хвои ели сибирской на Кольском полуострове // *Лесоведение*. 2014. № 2. С. 27–37.
13. Zribi I., Ghezal N., Sbai H., Richard G., Fauconnier M. L., Haouala R. Biochemical composition of Tunisian *Nigella sativa* L. at different growth stages and assessment of the phytotoxic potential of its organic fractions // *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*. 2019. Vol. 153, № 2. P. 205–212. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1454530>
14. Habashi H., Moslehi M., Shabani E., Pypker T., Rahmani R. Chemical content and seasonal variation of throughfall and litterflow under individual trees in the Hyrcanian forests of Iran // *Journal of Sustainable Forestry*. 2019. Vol. 38, № 2. P. 183–197. <https://doi.org/10.1080/10549811.2018.1554496>
15. Юркевич И. Д., Ловчий Н. Ф. Сосновые леса Белоруссии (типы, ассоциации, продуктивность). Минск : Наука и техника, 1984. 123 с.
16. Мелехов И. С. Лесоведение : учебник для вузов. 3-е изд., стер. М. : МГУЛ, 2005. 324 с.
17. Силкин П. П. Методы многопараметрического анализа структуры годичных колец хвойных. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2010. 335 с.
18. Miller J., Miller J. C. Statistics and chemometrics for analytical chemistry. USA : Pearson Education, 2018. 297 p.
19. Balzano A., De Micco, V. Ćufar, K. De Luis M., Gričar J. Intra-seasonal trends in phloem traits in *Pinus* spp. from drought-prone environments // *IAWA Journal*. 2020. Vol. 41, № 2. P. 219–235. <https://doi.org/10.1163/22941932-00002112>



20. Прокушкин С. Г. Минеральное питание сосны : (на холодных почвах). Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 190 с.
 21. Cabot C., Martos S., Llugany M., Gallego B., Tolrà R., Poschenrieder C. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivore // *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. P. 67–74. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01171>
 22. Хох А. Н., Ермохин М. В. Установление места происхождения лесоматериалов из древесины сосны дендрохронологическим методом // *Криміналістичний вісник*. 2019. Т. 32, № 2. С. 67–74.
- ## References
1. Il'in V. B., Syso A. I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoi oblasti* [Microelements and heavy metals in soils and plants of Novosibirsk region]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2001. 229 p. (in Russian).
 2. Raskin I., Kumar P. N., Dushenkov S., Salt D. E. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 1994, vol. 5, no. 3, pp. 285–290.
 3. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (in Russian).
 4. Nakabayashi R., Saito K. Integrated metabolomics for abiotic stress responses in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, vol. 24, pp. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.01.003>
 5. Towett E. K., Shepherd K. D., Lee Drake B. Plant elemental composition and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectroscopy: Quantification under different analytical parameters. *X-Ray Spectrometry*, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 117–124. <https://doi.org/10.1002/xrs.2678>
 6. Kumar V., Sharma A., Bhardwaj R., Thukral A. K. Elemental composition of plants and multivariate analysis. *National Academy Science Letters*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 45–50. <https://doi.org/10.1007/s40009-018-0715-1>
 7. Han W. X., Fang J. Y., Reich P. B., Ian Woodward F., Wang Z. H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. *Ecology Letters*, 2011, vol. 14, no. 8, pp. 788–796. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01641.x>
 8. Ji H., Wen J., Du B., Sun N., Berg B., Liu C. Comparison of the nutrient resorption stoichiometry of *Quercus variabilis* Blume growing in two sites contrasting in soil phosphorus content. *Annals of Forest Science*, 2018, vol. 75, no. 2, pp. 59. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0727-5>
 9. Linnik V. G., Minkina T. M., Bauer T. V., Saveliev A. A., Mandzhiyeva S. S. Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals pollution around coal-fired power station. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 4087–4100. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00361-z>
 10. Turkyilmaz A., Sevik H., Isinkaralar K., Cetin M. Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 5, pp. 5122–5130. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3962-2>
 11. Goyal D., Yadav A., Prasad M., Singh T. B., Shrivastav P., Ali A., Mishra S. Effect of Heavy Metals on Plant Growth: An Overview. In: *Contaminants in Agriculture*. Springer, Cham, 2020, pp. 79–101. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27583.87204>
 12. Sukhareva T. A. Seasonal dynamics of siberian spruce foliage chemistry in kola peninsula. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 2, pp. 27–37 (in Russian).
 13. Zribi I., Ghezal N., Sbair H., Richard G., Fauconnier M. L., Haouala R. Biochemical composition of Tunisian *Nigella sativa* L. at different growth stages and assessment of the phytotoxic potential of its organic fractions. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing With All Aspects of Plant Biology*, 2019, vol. 153, no. 2, pp. 205–212. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1454530>
 14. Habashi H., Moslehi M., Shabani E., Pypker T., Rahmani R. Chemical content and seasonal variation of throughfall and litterflow under individual trees in the Hyrcanian forests of Iran. *Journal of Sustainable Forestry*, 2019, vol. 38, no. 2, pp. 183–197. <https://doi.org/10.1080/10549811.2018.1554496>
 15. Yurkevich I. D., Lovchik N. F. *Sosnovye lesa Belorussii* [Pine Forests of Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1984. 123 p. (in Russian).
 16. Melekhov I. S. *Lesovodstvo* [Forestry]. 3rd ed., ster. Moscow, MGUL Publ., 2005. 324 p. (in Russian).
 17. Silkin P. P. *Metody mnogoparametricheskogo analiza struktury godichnykh kolets khvoynykh* [The Methods of Multiparameter Analysis of the Structure of Annual Rings of Conifers]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyi universitet Publ., 2015. 335 p. (in Russian).
 18. Miller J., Miller J. C. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. USA, Pearson Education, 2018. 297 p.
 19. Balzano A., De Micco, V. Čufar, K. De Luis M., Gričar J. Intra-seasonal trends in phloem traits in *Pinus* spp. from drought-prone environments. *IAWA Journal*, 2020, vol. 41, no. 2, pp. 219–235. <https://doi.org/10.1163/22941932-00002112>
 20. Prokushkin S. G. *Mineral'noe pitanie sosny (na kholodnykh pochvakh)* [Mineral nutrition of pine (on cold soils)]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskoe otdelenie Publ., 1982. 190 p. (in Russian).
 21. Cabot C., Martos S., Llugany M., Gallego B., Tolrà R., Poschenrieder C. A role for zinc in plant defense against pathogens and herbivore. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 10, pp. 67–74. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01171>
 22. Khokh A. N., Ermokhin M. V. The determination of pine timber place of origin by using dendrochronological method. *Forensic Bulletin*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 67–74 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.06.21; одобрена после рецензирования 26.06.21; принята к публикации 29.06.21
The article was submitted 22.06.21; approved after reviewing 26.06.21; accepted for publication 29.06.21