

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КСИЛЕМЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПЕЦИФИКИ ПОЧВЕННО-ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ И ФАЗЫ ВЕГЕТАЦИИ

А.Н. Хох

Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз
Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь, e-mail: 1ann1hoh@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования содержания Ca, Cu, Ka, Mn, Pb, Rb, Sr и Zn в ксилеме сосны обыкновенной в зависимости от почвенно-грунтовых условий произрастания и фазы вегетации. На основе сравнения элементного состава построены матрицы парных корреляций и дендрограммы распределения исследованных типов леса по кластерам.

Ключевые слова. Сосна обыкновенная, элементный состав, рентгенофлуоресцентный анализ, почвенно-грунтовые условия, фаза вегетации, корреляционные связи, кластерный анализ.

VARIABILITY OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF XYLEM OF SCOTS PINE DEPENDING ON THE SPECIFICITY OF SOIL AND GROUND CONDITIONS OF GROWTH AND THE PHASE OF VEGETATION

A.N. Khokh

Scientific and Practical Center of The State Forensic Examination Committee of
The Republic of Belarus,
Minsk, Belarus, e-mail: 1ann1hoh@gmail.com

Abstract. The results of an experimental study of the content of Ca, Cu, Ka, Mn, Pb, Rb, Sr and Zn in the xylem of Scots pine depending on the soil and ground conditions of growth and the vegetation phase are presented. Based on the comparison of the elemental composition, matrices of pair correlations and dendrograms of the distribution of the studied forest types by clusters are constructed.

Keywords: Scots pine, elemental composition, X-ray fluorescence analysis, soil and ground conditions, vegetation phase, correlation links, cluster analysis.

На физико-биохимические процессы, протекающие в растениях, помимо общеклиматических факторов, большое влияние оказывают и конкретные условия произрастания [1]. Они находят отражение в химическом составе растений, различия которого могут быть весьма значительны даже в пределах двух рядом расположенных участков. Химизм растений, произрастающих в естественных условиях, формируется под воздействием ряда факторов. Главными факторами, определяющими содержание какого-либо элемента в растениях, являются: 1) содержание его в почве; 2) относительное количество в почвах его форм, усвояемых растениями; 3) орган растения; 4) время его поглощения; 4) вид растения [2-4].

Цель работы заключалась в изучении изменчивости содержания ряда элементов в ксилеме сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от почвенно-грунтовых условий произрастания как основного показателя, характеризующего тип леса, и фазы вегетации.

Сосна обыкновенная была выбрана в качестве объекта исследования, поскольку является наиболее распространенной лесообразующей древесной породой в Беларуси.

Для определения элементного состава ксилемы сосны методом рентгенофлуоресцентного анализа в 2023 году в начале и конце вегетационного периода отбирались буровые керны у 25 деревьев на высоте 1,3 м по 1-му с дерева: один – в конце апреля, второй – в начале сентября.

На первом этапе работы наружная поверхность каждого керна срезалась ножом с керамическим лезвием и зачищалась с помощью гравера с насадкой из карбида вольфрама, чтобы избежать загрязнения древесины металлами, из которых изготовлен возрастной бур.

Впоследствии керны измельчались до мелкодисперсного состояния, отбиралась навеска массой 2-3 г, которая помещалась в фарфоровый тигель и проводилось озоление путем прокаливании 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 WC формировались «таблетки» диаметром 13 мм, толщиной около 1 мм для проведения измерений.

Определение содержания Ca, Cu, K, Mn, Pb, Rb, Sr и Zn проводилось на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX600B (Skyray Instruments, Китай).

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы IBM SPSS Statistics. При сравнении содержания элементов весной и осенью в пределах одного места отбора использовался W-критерий Вилкоксона, а при сравнении типов леса – H-критерий дисперсионного анализа Краскела-Уоллиса. Различия считались достоверными при $p < 0.05$. Процедуры классификации были проведены с использованием кластерного анализа (мера сходства – евклидово расстояние; дендрограммы составлялись по методу Уорда).

Отметим, что аналогичные исследования ранее были проведены для территории государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник» [5]. Для подтверждения выявленных закономерностей во взаимоотношениях между элементами в данной работе была изучена территория Томашевского лесничества Брестского лесхоза. Анализировались те же типы леса, за одним исключением: вместо сосняка сфагнового временная пробная площадь была заложена в сосняке осоково-

сфагновом (таблица 1).

Таблица 1 – Таксационно-лесоводственные показатели древостоев сосны обыкновенной на временных пробных площадях в Томашевском лесничестве

№	Квар- тал	Вы- дел	Тип леса	ТЛУ	Породный состав	Средний возраст, лет	Класс бонитета	Пол- нота	Средний диаметр, см	Средняя высота, м
									$M_x \pm SD$	
1	3	3	С. вер.	A2	10С	100	3	0,7	32±0,7	20±1,3
2	72	1	С. мш.	A2	10С+С	95	2	0,7	26±0,8	21±1
3	324	26	С. ор.	B2	10С	100	1	0,5	32±1,1	27±1,2
4	13	13	С. кис.	C2	10С	90	1	0,6	30±1,4	27±0,9
5	152	7	С. дм.	A4	10С	90	2	0,7	28±1,7	24±1,1
6	282	6	С. баг.	A5	10С	90	5А	0,7	18±1,1	15±1,4
7	271	15	С. ос.-сф.	A5	6С4Б	90	5А	0,7	8±0,8	9±0,7

Примечание: С. вер. – сосняк вересковый, С. мш. – сосняк мшистый, С. ор. – сосняк орляковый, С. кис. – сосняк кисличный, С. дм. – сосняк долгомошный, С. баг. – сосняк багульниковый, С. ос.-сф. – осоково-сфагновый, ТЛУ – тип лесорастительных условий, M_x – среднее значение, SD – стандартное отклонение.

В таблице 2 представлены усредненные данные по содержанию элементов в ксилеме сосны, рассчитанные с учетом количественных измерений у 25 деревьев для каждого из семи исследованных типов леса в весенний и осенний периоды вегетации.

Таблица 2 – Содержание элементов в ксилеме (мг/кг)

Элемент	С. вер.		С. мш.		С. ор.		С. кис.		С. дм.		С. баг.		С. сф.	
	весна	осень	весна	осень	весна	осень	весна	осень	весна	осень	весна	осень	весна	осень
Ca	562,3	608,7	624,3	593,6	556,9	553,8	635,6	592,9	528,5	555,6	494,8	475,1	413,8	433,7
±SD	80,8	83,5	67,5	70,6	82,7	80,1	94,0	96,8	82,1	67,7	59,6	70,1	53,4	56,6
Cu	1,6	1,0	1,6	1,0	1,6	1,1	1,6	1,0	1,7	1,1	1,6	1,1	1,7	1,0
±SD	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
K	551,2	561,2	553,8	525,6	541,0	561,5	549,1	595,3	451,7	433,6	421,3	448,8	266,0	277,9
±SD	67,4	62,9	96,2	67,1	71,2	82,9	72,9	59,8	66,8	61,9	43,5	60,2	60,9	67,2
Mn	42,4	47,9	75,6	74,6	74,6	77,4	66,5	67,9	43,6	41,6	41,6	41,8	43,9	49,2
±SD	3,9	6,3	5,6	5,1	6,4	6,2	6,4	5,9	4,3	4,6	4,4	3,9	4,6	5,7
Pb	2,1	2,2	2,2	2,5	2,4	2,1	2,1	2,3	2,2	2,2	3,2	3,2	4,5	4,6
±SD	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
Rb	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,5	1,4	1,5	1,7	1,7
±SD	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Sr	1,1	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,4	1,5	1,3	1,5	1,5	1,4
±SD	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Zn	6,7	7,1	7,9	7,6	7,7	7,9	6,7	7,2	8,0	8,5	8,3	8,3	11,4	12,1
±SD	1,1	1,3	1,3	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	0,8	1,3	1,0	1,1	2,7	2,7

Примечание: SD – стандартное отклонение.

Экспериментально установлено, что вне зависимости от почвенно-грунтовых условий произрастания к концу вегетационного периода в ксилеме сосны отмечается уменьшение содержания Cu в 1,6 раза и увеличение содержания Mn – в 1,1 раза ($p < 0,05$). С ухудшением условий по богатству почвы и увлажнению фиксируется уменьшение содержания Ca в 1,4 раза, K в 2 раза, Mn в 1,5 раза и увеличение содержания Pb в 2 раза, Rb в 1,5 раза, Sr в 1,3 раза

и Zn в 1,6 раза. Различия для всех элементов по типам леса обнаружены на высоком уровне статистической значимости ($p < 0,0001$), исключение составила Cu, для которой изменчивость по типам леса отсутствует. Отмеченные тенденции экологической и сезонной изменчивости содержания исследованных элементов хорошо согласуются с результатами, полученными ранее [5], что говорит о возможности их экстраполяции на аналогичные объекты из других районов Беларуси.

Расчет парных коэффициентов ранговой корреляции Спирмена между элементами приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Корреляционные связи между содержанием элементов

	Ca_весна	Cu_весна	K_весна	Mn_весна	Pb_весна	Rb_весна	Sr_весна	Zn_весна
Ca_весна	1							
Cu_весна	-0,038	1						
K_весна	0,581**	0,026	1					
Mn_весна	0,398**	-0,024	0,481**	1				
Pb_весна	-0,488**	-0,101	-0,576**	-0,290**	1			
Rb_весна	-0,443**	-0,031	-0,552**	-0,434**	0,491**	1		
Sr_весна	-0,291**	0,017	-0,451**	-0,306**	0,343**	0,400**	1	
Zn_весна	-0,378**	-0,017	-0,407**	-0,193*	0,413**	0,271**	0,332**	1
	Ca_осень	Cu_осень	K_осень	Mn_осень	Pb_осень	Rb_осень	Sr_осень	Zn_осень
Ca_осень	1							
Cu_осень	0,123	1						
K_осень	0,488**	-0,030	1					
Mn_осень	0,227**	0,029	0,330**	1				
Pb_осень	-0,424**	0,016	-0,485**	-0,393**	1			
Rb_осень	-0,382**	0,027	-0,543**	-0,494**	0,461**	1		
Sr_осень	-0,284**	0,032	-0,444**	-0,462**	0,357**	0,938**	1	
Zn_осень	-0,299**	0,057	-0,484**	-0,150*	0,316**	0,390**	0,311**	1
	Ca_осень	Cu_осень	K_осень	Mn_осень	Pb_осень	Rb_осень	Sr_осень	Zn_осень
Ca_весна	0,436**	-0,083	0,509**	0,393**	-0,485**	-0,470**	-0,389**	-0,399**
Cu_весна	-0,027	-0,130	0,042	0,045	-0,061	-0,038	-0,035	-0,158*
K_весна	0,482**	-0,034	0,596**	0,455**	-0,569**	-0,535**	-0,441**	-0,491**
Mn_весна	0,277**	-0,025	0,478**	0,771**	-0,308**	-0,535**	-0,487**	-0,271**
Pb_весна	-0,460**	-0,027	-0,523**	-0,348**	0,545**	0,430**	0,327**	0,387**
Rb_весна	-0,404**	0,123	-0,552**	-0,415**	0,416**	0,562**	0,486**	0,370**
Sr_весна	-0,413**	-0,039	-0,429**	-0,315**	0,307**	0,395**	0,322**	0,361**
Zn_весна	-0,415**	0,091	-0,448**	-0,125	0,392**	0,352**	0,291**	0,401**

Примечание – *корреляция значима на уровне 0,05; **корреляция значима на уровне 0,01.

Результаты корреляционного анализа выявили наличие положительных и отрицательных корреляционных связей между содержанием ряда элементов. При этом для меди корреляционные связи с другими изучаемыми элементами отсутствуют (исключение Cu_весна-Zn_осень).

Также в рамках данной работы был проведен кластерный анализ полученных данных о содержании элементов в ксилеме сосны для исследованных типов леса отдельно для весеннего

и осеннего периодов.

Как можно видеть из представленных на рисунке 1 дендрограммах, в начале и в конце вегетационного периода деревья сосны, произрастающие в исследованных типах леса, формируют 3 обособленных кластера. В обоих случаях индивидуальный кластер (кластер 1) формируют деревья из сосняка сфагнового, в кластер 2 попадают деревья из сосняка долгомошного и сосняка багульниково-го, деревья из сосняка верескового, сосняка мшистого, сосняка орлякового и сосняка кисличного образуют кластер 3.

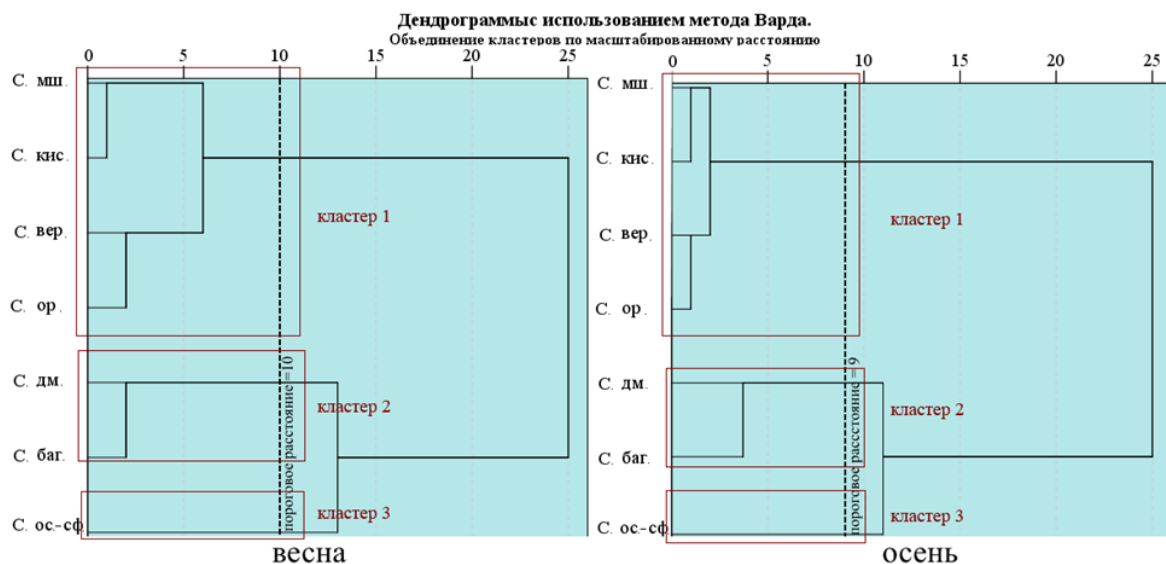


Рисунок 1 – Горизонтальные дендрограммы распределения исследованных типов леса по кластерам на основе сравнения элементного состава ксилемы сосны

Кластеризация сосняков по содержанию элементов в ксилеме согласуется с результатами ранее проведенного кластерного анализа [4] и соответствует трем группам древесно-кольцевых хронологий, выделенных по богатству почвы и режиму увлажнения: сосняки на почвах неустойчивого и нормального увлажнения, сосняки на почвах избыточного увлажнения, сосняки на верховых болотах.

Таким образом, полученные дополнительные результаты согласуются с уже полученными для территории Березинского биосферного заповедника и подтверждают ранее выявленные закономерности. Так, показано, что с ухудшением условий по богатству почвы и увлажнению отмечается уменьшение содержания в ксилеме Ca, K, Mn и увеличение содержания Pb, Rb, Sr, Zn; к концу вегетационного периода независимо от условий роста отмечается уменьшение содержания Cu и увеличение содержания Mn.

Список литературы

1. Hafeez M. B. Growth, physiological, biochemical and molecular changes in plants induced by magnetic fields: A review/ M. B. Hafeez [et al.] //Plant Biology. – 2023. – Vol. 25. – №. 1. – P. 8-23.
2. Phuong H. T. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants / H. T. Phuong [et al.] //Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 55. – №. 7. – P. 2650-2655.

3. Asare M. O. The fate of secondary metabolites in plants growing on Cd-, As-, and Pb-contaminated soils—a comprehensive review/ M. O. Asare, J. Száková, P. Tlustoš //Environmental science and pollution research. – 2023. – Vol. 30. – №. 5. – P. 11378-11398.

4. Štofejová L. Analysis of heavy metal content in soil and plants in the dumping ground of magnesite mining factory Jelšava-Lubeník (Slovakia) / L. Štofejová, J. Fazekaš, D. Fazekašová //Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – №. 8. – P. 4508.

5. Хох А. Н. Особенности элементного состава древесины сосны обыкновенной в зависимости от условий местопроизрастания и фазы вегетации / А. Н. Хох, В. Б. Звягинцев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 47–56.

References

1. Hafeez M. B. Growth, physiological, biochemical and molecular changes in plants induced by magnetic fields: A review/ M. B. Hafeez [et al.] //Plant Biology. – 2023. – Vol. 25. – №. 1. – P. 8-23.

2. Phuong H. T. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants / H. T. Phuong [et al.] //Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 55. – №. 7. – P. 2650-2655.

3. Asare M. O. The fate of secondary metabolites in plants growing on Cd-, As-, and Pb-contaminated soils—a comprehensive review/ M. O. Asare, J. Száková, P. Tlustoš //Environmental science and pollution research. – 2023. – Vol. 30. – №. 5. – P. 11378-11398.

4. Štofejová L. Analysis of heavy metal content in soil and plants in the dumping ground of magnesite mining factory Jelšava-Lubeník (Slovakia) / L. Štofejová, J. Fazekaš, D. Fazekašová //Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – №. 8. – P. 4508.

5. Khokh A. N. 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. Khokh, V. B. Zviagintsev // Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology. – 2022. – Vol.. 22. – No. 1. – pp. 47–56.