

УДК 581.192+574.24

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ХВОИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (на примере города Минска)

**А. Н. Хох**

заведующий лабораторией исследования материалов, веществ и изделий  
Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз  
Республики Беларусь

**В. Б. Звягинцев**

кандидат биологических наук, доцент  
Белорусский государственный технологический университет

*В работе обоснована возможность применения метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой в целях контроля за состоянием городских фитоценозов. Проведено сравнение степени накопления и выявлены особенности аккумуляции элементов в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в местах г. Минска с различным по интенсивности автотранспортным и промышленным воздействием. В целом по результатам исследования можно констатировать, что ассимиляционный аппарат играет роль регуляторного звена в функционировании растительных организмов и весьма чувствителен к изменению условий произрастания.*

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, элементный состав, хвоя, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой, антропогенные факторы.

### Введение

Растения играют важную роль в круговороте питательных веществ и микроэлементов в окружающей среде. Биомониторинг ряда химических элементов необходим для оценки состояния экосистем, особенно урбанизированных.

Хвоя сосны является чувствительным биоиндикатором загрязнения воздуха промышленностью [1] и транспортом [2].

В условиях антропогенного загрязнения часто встречаются проявления антагонистических отношений между элементами, входящими в состав хвои [3]. Так, например, поглощение кальция и магния растениями может быть ингибировано при высоких концентрациях алюминия в почвах [4]. Угнетающим действием на поглощение этих элементов обладает также калий [5].

Экстремальный уровень антропогенного воздействия на среду города определяет необходимость контроля за их последствиями и принятия мер по их минимизации.

В связи с тем что у сосны обыкновенной физиологическое ослабление и внешние признаки повреждения (хлороз и некроз хвои) проявляются не сразу, необходим поиск показателей, которые позволили бы оценить состояние древесной растительности на том этапе, когда происходящие в растительном организме изменения еще носят обратимый характер. В качестве таких показателей может быть использован элементный состав хвои.

Целью работы являлось изучение изменений элементного состава в ассимиляционных органах сосны обыкновенной, подвергающейся воздействию антропогенного загрязнения, по сравнению с фоновыми территориями.

Основными задачами было: определение пунктов сбора образцов хвои; обоснование возможности применения метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой в целях контроля за состоянием урбанизированных экосистем; сравнение степени накопления и выявления особенностей аккумуляции элементов в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в местах с различным по интенсивности автотранспортным и промышленным воздействием г. Минска.

### Материалы и методы исследований

Объектами исследования являлись сосновые насаждения Первомайского (с благоприятной экологической ситуацией) и Партизанского (с преимущественно наиболее неблагоприятной ситуацией, обусловленной высоким уровнем загрязнения воздуха и почв, угнетением растительности [6]) районов города Минска; в качестве контроля (условно чистая территория) были взяты деревья сосны, произрастающие на территории государственного природоохранного учреждения “Березинский биосферный заповедник”.

Краткая характеристика исследованных древостоев представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Места отбора образцов

№№	Район, улица/лесничество	Координаты	Средний возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см
1	Первомайский, Всехсвятская	53°57'46.3"N 27°35'59.8"E	70	18	17,2
2	Первомайский, Вересковая	53°56'45.1"N 27°39'23.5"E	70	17,5	25,5
3	Партизанский, Герасименко	53°52'41.4"N 27°41'18.7"E	80	19	30,8
4	Партизанский, Ваупшасова	53°54'04.3"N 27°40'06.8"E	70	23	29,9
5	Партизанский, Долгобродская	53°52'51.3"N 27°37'22.0"E	75	21	27,4
6	Березинский биосферный заповедник, Домжерицкое	54°43'24.0"N 28°17'11.5"E	80	24	33,1

Образцы хвои сосны обыкновенной 2-го года жизни отбирали на каждом из перечисленных мест отбора с ветвей 1-го порядка в нижней части по всему диаметру кроны у 15 деревьев в конце вегетационных сезонов 2018 и 2019 гг. (по 30 пар с каждого дерева).

В дальнейшем хвоя, собранная с одного дерева, измельчалась до мелкодисперсного состояния с помощью агатовой ступки, после чего методом квартования отбиралась навеска массой 500 мг, которая помещалась в фарфоровый тигель, и проводилось озоление путем прокалывания в муфельной печи при температуре 500°C в течение 4 часов.

Далее зола помещалась в цилиндр картриджа систем микроволнового разложения с уже внесенными туда 10 мл концентрированной азотной кислоты и 2 мл пероксида водорода. Микроволновое разложение проводилось в две последова-



## Окончание таблицы 2

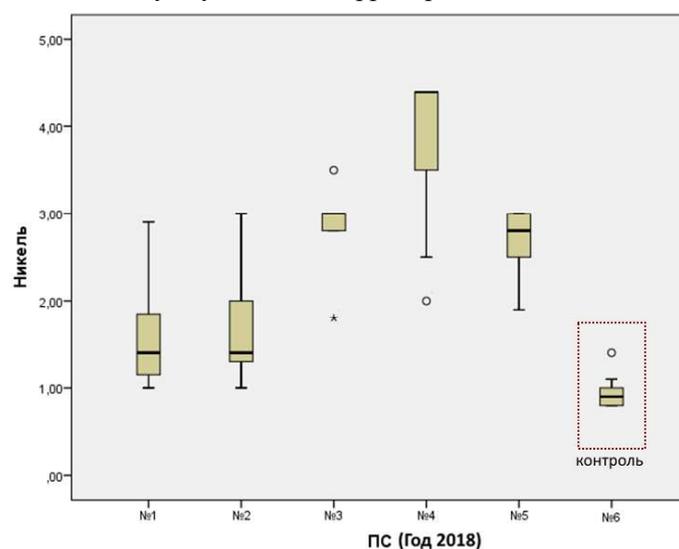
Элемент, мг/кг	№1		№2		№3		№4		№5		№6	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Zn	22,3±4,8	22,7±6,1	53,4±8,9	50±15,3	50,2±8,6	53,7±11,2	84,5±21,7	95±17,8	53,5±9,3	56,8±14,0	24,7±4,8	25,8±7,5
Значение W	63,0		43,5		72,0		61,0		73		62,5	
p-value	0,86		0,35		0,5		0,6		0,46		0,89	
Значение U	145,5	132,5	0,000	1,0	0,000	0,5	0,000	0,000	0,000	15,00		
p-value	0,17	0,41	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Mn	232,9 ±42,1	224,4 ±55,4	212,0 ±51,0	207,3 ±55,0	226,4 ±36,8	233,3 ±64,4	233,8 ±36,7	220,7 ±56,6	225,2 ±50,3	231,3 ±49,0	211,3 ±47,4	214 ±66,8
Значение W	55,5		49,5		63		48,5		58		64,5	
p-value	0,80		0,85		0,87		0,51		0,91		0,8	
Значение U	77,5	104,5	104,5	122,0	80,5	96,5	75,5	106,0	90,0	93		
p-value	0,15	0,74	0,74	0,71	0,19	0,51	0,13	0,8	0,37	0,43		
Ni	1,6±0,6	1,0±0,3	1,7±0,5	1,2±0,5	2,9±0,3	2,6±0,4	3,8±0,8	3,7±0,9	2,7±0,4	2,1±0,6	0,9±0,2	1,0±0,3
Значение W	5,0		12,5		10,5		21,5		11,5		20,6	
p-value	0,03		0,01		0,01		0,54		0,006		0,04	
Значение U	14,0	115,5	10,5	73,0	0,000	1,0	0,000	0,000	0,000	11,0		
p-value	0,000	0,9	0,000	0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Co	0,9±0,3	0,9±0,3	0,9±0,5	0,9±0,4	0,9±0,2	1,2±0,3	1,2±0,4	1,5±0,2	1,2±0,4	1,1±0,3	0,8±0,2	0,9±0,2
Значение W	22,5		60,0		68,5		62,5		23,5		53,5	
p-value	0,6		0,64		0,02		0,23		0,40		0,6	
Значение U	93,0	110,0	93,0	110,0	87,0	57,0	41,5	29,0	43,0	72,0		
p-value	0,44	0,9	0,44	0,9	0,31	0,02	0,002	0,000	0,003	0,1		
Fe	53,7 ±13,7	55,7 ±15,9	61,9 ±6,7	58,1 ±14,2	102,1 ±10,6	113,6 ±16,4	115,3 ±22,7	130,7 ±17,1	125,0 ±18,3	144,7 ±19,8	32,7 ±7,3	31,9 ±7,6
Значение W	63,0		56,0		78,5		88,5		106,0		48,5	
p-value	0,87		0,82		0,02		0,02		0,009		0,8	
Значение U	14,0	8,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
p-value	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
Cr	0,4±0,2	0,4±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,6±0,1	0,5±0,2	0,5±0,2	0,6±0,2	0,5±0,2	0,7±0,1	0,4±0,1	0,3±0,1
Значение W	35,5		26,5		0,00		42,0		62,0		9,0	
p-value	0,47		0,17		0,16		0,8		0,01		0,009	
Значение U	113,5	64,5	101,0	50,0	57,0	35,0	102,0	55,0	74,5	1,5		
p-value	0,97	0,045	0,009	0,00	0,02	0,001	0,68	0,02	0,12	0,000		

Примечание: *M* – среднее,  $\pm SD$  – стандартное отклонение; курсивом выделены значения p-value на уровне  $< 0,05$

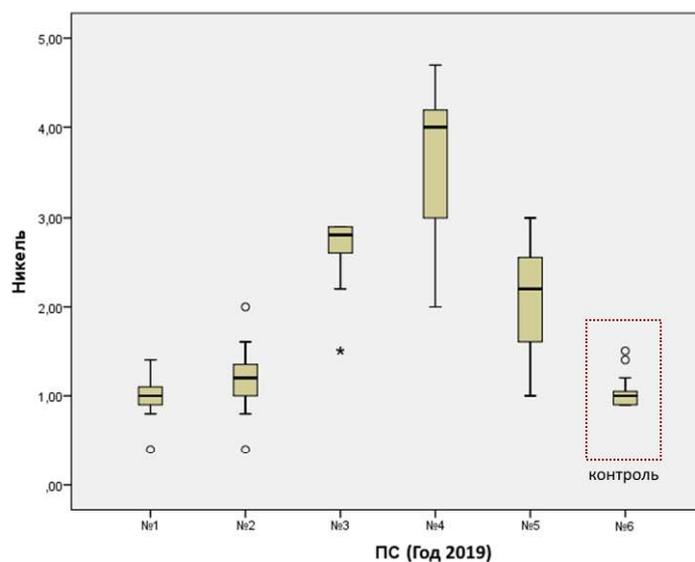
Прежде всего, нами была рассмотрена погодичная изменчивость, которая является одной из разновидностей временной изменчивости для многолетних растений. В методическом отношении достоверность экологической изменчивости химизма растений может быть подтверждена лишь в том случае, когда будет установлено, что соответствующие различия превышают те, которые вызваны погодичной изменчивостью.

По результатам анализа содержания алюминия, свинца, цинка и марганца для всех исследованных мест отбора в независимости от уровня антропогенной нагрузки не было выявлено статистически значимых различий между 2019 и 2020 гг. ( $p > 0,05$ ), т. е. для данных элементов погодичная изменчивость отсутствовала. В случае с кадмием и кобальтом установлена статистически значимая разница для древостоя № 3, в случае с медью и хромом для двух древостоев – № 3 и № 5, а так-

же № 3 и № 6 соответственно. По железу статистически значимые различия были выявлены для трех древостоев (№№ 3-5), по никелю – для пяти (№№ 1-3, 5-6). На рисунке 1 для примера приведена диаграмма размахов, отображающая разницу в содержании никеля между изучаемыми территориями в 2018 и 2019 гг.



**Рисунок 1** – Содержание никеля на исследуемых территориях в 2018 г.



**Рисунок 2** – Содержание никеля на исследуемых территориях в 2019 г.

Экологическая изменчивость, определяемая в данном исследовании уровнем антропогенной нагрузки, в проводимом исследовании изучалась отдельно для 2018 и 2019 гг.

Установлено, что содержание марганца в хвое сосны не зависит от уровня антропогенной нагрузки. Также следует отметить свинец, для которого выявлены статистически значимые отличия по сравнению с контролем на всех местах отбора в Партизанском районе, в то время как для Первомайского экологическая изменчивость отсутствовала.

В целом сравнение погодичной и экологической изменчивости химизма хвои сосны по всем исследуемым элементам, за исключением марганца, показало четко прослеживаемую зависимость: экологическая изменчивость больше погодичной.

Также отметим, что минимальное варьирование в хвое сосны отмечено для алюминия (средний коэффициент вариации составил 13,2%), а максимальное – для кадмия (это единственный элемент, средний коэффициент вариации которого превысил 33% и составил 37,1%). Принято считать, что если значение коэффициента вариации менее 33%, то совокупность данных является однородной, если более 33% – то неоднородной [8]. В целом чем меньше значение коэффициента вариации, тем однороднее совокупность по изучаемому признаку и типичнее средняя.

Для предварительной оценки зависимости содержания элементов в хвое сосны от уровня антропогенной нагрузки (1 – контроль (условно чистая территория); 2 – низкий уровень антропогенной нагрузки; 3 – высокий уровень антропогенной нагрузки) был проведен парный регрессионный анализ, который в 2018 г. выявил высокодостоверные взаимосвязи для алюминия, свинца, кадмия меди, цинка, никеля, кобальта и железа. Для магния и хрома достоверных взаимосвязей не выявлено. В 2019 г. достоверные взаимосвязи выявлены только для алюминия, цинка и кобальта, что позволяет предположить, что содержание данных элементов в наибольшей степени определяется уровнем антропогенной нагрузки.

Параметры уравнений линейной регрессии, аппроксимируемых линейными уравнениями вида  $y = a + bx$ , описывающих закономерность между исследуемым параметром, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты регрессионного анализа

Элемент	Уравнение регрессии	
	Год 2018	Год 2019
Al	$y = 0,0207x - 0,5057, R^2 = 0,8418, r = 0,92, p = 0,000$	$y = 0,0135x + 0,4573, R^2 = 0,4814, r = 0,69, p = 0,000$
Pb	$y = 1,0866x - 1,0151, R^2 = 0,6616, r = 0,66, p = 0,000$	$y = 0,0132x + 1,9588, R^2 = 0,0024, r = 0,05, p = 0,74$
Cd	$y = 4,417x + 0,9857, R^2 = 0,4613, r = 0,68, p = 0,000$	$y = -0,0078x + 2,0129, R^2 = 0,0042, r = -0,07, p = 0,67$
Cu	$y = 0,5336x + 0,0028, R^2 = 0,8597, r = 0,92, p = 0,000$	$y = 0,0696x + 1,7018, R^2 = 0,0842, r = 0,29, p = 0,05$
Zn	$y = 0,0443x + 0,1521, R^2 = 0,842, r = 0,91, p = 0,000$	$y = 0,0381x + 0,455, R^2 = 0,6693, r = 0,81, p = 0,000$
Mn	$y = 0,0046x + 0,9936, R^2 = 0,0417, r = 0,20, p = 0,18$	$y = 0,002x + 1,5923, R^2 = 0,0192, r = 0,14, p = 0,36$
Ni	$y = 0,786x + 0,5075, R^2 = 0,8646, r = 0,93, p = 0,000$	$y = 0,0417x + 1,9042, R^2 = 0,0336, r = 0,18, p = 0,23$
Co	$y = 1,6304x + 0,4409, R^2 = 0,2246, r = 0,47, p = 0,001$	$y = -0,0364x + 2,0367, R^2 = 0,0001, r = -0,01, p = 0,94$
Fe	$y = 0,0222x + 0,484, R^2 = 0,9055, r = 0,95, p = 0,000$	$y = 0,017x + 0,8315, R^2 = 0,7765, r = 0,88, p = 0,000$
Cr	$y = 1,7911x + 1,1688, R^2 = 0,0796, r = 0,28, p = 0,06$	$y = 4,2709x + 0,1856, R^2 = 0,5505, r = 0,74, p = 0,000$

Примечание:  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $r$  – коэффициент корреляции;  $p$  – уровень значимости.

На рисунках 3 и 4 для примера показана взаимосвязь содержания алюминия и марганца от уровня антропогенной нагрузки в 2018 г. По рисункам 3 и 4 видно, что в случае алюминия существует прямая, сильная корреляционная связь ( $r = 0,92$ ;  $p = 0,000$ ), а в случае марганца такая связь отсутствует ( $r = 0,20$ ;  $p = 0,18$ ), т.е. содержание марганца от уровня антропогенной нагрузки не зависит.

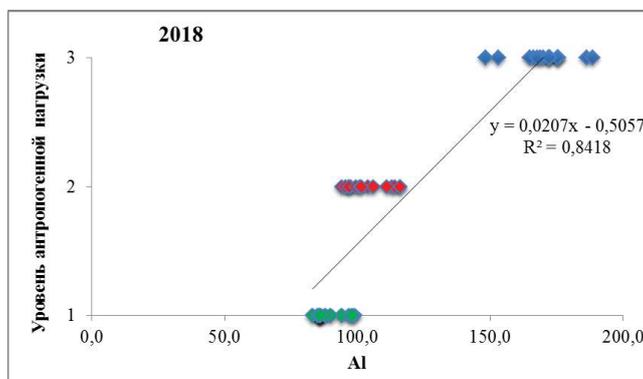


Рисунок 3 – Зависимость содержания *Al* от уровня антропогенной нагрузки (в условных единицах)

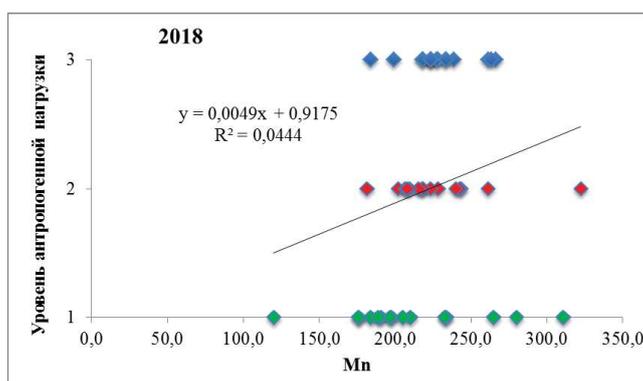


Рисунок 4 – Зависимость содержания *Mn* от уровня антропогенной нагрузки (в условных единицах)

Отметим, что ранее нами для указанных объектов (№№ 1-6) был проведен анализ морфолого-анатомических и билатеральных (по величине флуктуирующей асимметрии) параметров хвои [9]; полученные результаты согласуются между собой, что позволяет в дальнейшем проводить комплексный анализ для осуществления контроля за состоянием городских фитоценозов.

### Заключение

Таким образом, установлено, что в условиях антропогенного загрязнения происходят изменения химического состава хвои сосны обыкновенной, которые проявляются в накоплении элементов, преимущественно связанных с техногенезом. Применение методов математической обработки позволило судить о достоверности различий их содержания в хвое сосновых насаждений, произрастающих в местах г. Минска с различным по интенсивности автотранспортным и промышленным воздействием. Полученные результаты исследований по оценке степени

накопления и выявлению особенностей аккумуляции ряда элементов открывают перспективы для оценки степени благоприятности условий среды для произрастания сосны обыкновенной.

Характер исследования потребовал массового сбора хвои и применения метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, позволяющего осуществить многочисленные индивидуальные анализы образцов с одновременным определением целого ряда микроэлементов.

В целом проведенное исследование доказывает, что ассимиляционный аппарат играет роль регуляторного звена в функционировании растительных организмов и весьма чувствителен к изменению условий произрастания.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Майджи, О. В.** Загрязнение атмосферного воздуха автомобильным транспортом в г. Балашиха / О. В. Майджи // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2010. – № 8. – С. 54–59.
2. **Бородина, Н. А.** Аккумуляция тяжелых металлов хвоей сосны в урбоэкосистеме города Благовещенска / Н. А. Бородина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1–8 – С. 1958–1962.
3. **Второва, В. Н.** Концентрации химических элементов в растениях и почве и оценка состояния лесных экосистем / В. Н. Второва, Л. Б. Холопова // Лесоведение. – 2009. – № 1. – С. 11–17.
4. **Ulrich, B.** Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand / B. Ulrich // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. – 1981. – Vol. 144. – № 3. – P. 289–305.
5. **Hambuckers, A.** Nutritional status of declining spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): Effect of soil organic matter turnover rate / A. Hambuckers, J. Remacle // Water, Air, and Soil Pollution. – 1991. – V. 59. – № 1. – P. 95–106.
6. **Хомич, В. С.** Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич, С. В. Какаренко, Т. И. Кухарик // под ред. В. С. Хомича. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 301 с.
7. **Väisänen, A.** Determination of mineral and trace element concentrations in pine needles by ICP-OES: evaluation of different sample pre-treatment methods / A. Väisänen, P. Laatikainen, A. Pander, S. Renvall // International Journal of Environmental and Analytical Chemistry. – 2008. – V. 88. – № 14. – P. 1005–1016.
8. **Miller, J.** Statistics and chemometrics for analytical chemistry / J. Miller, J. Miller // USA: Pearson Education, 2018. – 297 p.
9. **Хох, А. Н.** Влияние антропогенного загрязнения на морфолого-анатомические параметры и спектральные характеристики хвои сосны обыкновенной / А. Н. Хох, В. Б. Звягинцев // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2021. – № 1(37). – С. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2021.37.6>

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

Контакты: [lann1hoh@gmail.com](mailto:lann1hoh@gmail.com) (Хох Анна Николаевна, Звягинцев Вячеслав Борисович)

### **Khokh A. N., Zvyagintsev V. B. VARIABILITY OF PINE ELEMENTAL COMPOSITION UNDER THE ANTHROPOGENIC IMPACT (the case of Minsk).**

*In the work, the possibility of using the atomic emission spectrometry method with inductively coupled plasma in order to control the state of urban phytocenoses is demonstrated. The incorporation rate has been compared; the peculiarities of elemental accumulation in the Scots pine growing on the sites of Minsk with different intensity of automobile and industrial impact have been discovered. In general, on the basis of the research results it can be stated that the assimilation apparatus represents a regulatory element in the functioning of plants which is quite sensitive to any change of site conditions.*

**Keywords:** Scots Pine, element composition, pine needles, spectrometry with inductively coupled plasma, anthropogenic factors.