

А. Н. Хох
В. Б. Звягинцев

Влияние антропогенного загрязнения на морфолого-анатомические параметры и спектральные характеристики хвои сосны обыкновенной

В работе проведен комплексный сравнительный анализ состояния хвойных насаждений г. Минска из районов с благоприятной и с преимущественно наиболее неблагоприятной экологической ситуацией и контрольных деревьев, произрастающих на условно чистых территориях. Выявлены морфолого-анатомические и билатеральные (по величине флуктуирующей асимметрии) закономерности изменения хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), отражающие выраженность антропогенного пресса на городскую среду. Показана возможность применения метода ИК-Фурье спектроскопии в сочетании с хемометрическими алгоритмами анализа для дифференциации образцов хвои. С помощью метода главных компонент исследуемые образцы были разделены на кластеры, отражающие степень их антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, хвоя, морфолого-анатомические параметры, флуктуирующая асимметрия, ИК-Фурье спектроскопия, антропогенные факторы, г. Минск.

Введение

В настоящее время загрязнение атмосферного воздуха является мощным антропогенным фактором, вызывающим изменения функционирования фитоценозов в городской среде. Токсические компоненты выбросов промышленных предприятий и автотранспорта приводят к серьезным нарушениям поверхности и внутриклеточной структуры ассимилирующих органов растений, а также оказывают влияние на формирование их химического состава. Во многом это обусловлено низкой толерантностью растений к загрязнителям атмосферы в связи с автотрофным характером метаболизма.

В связи с этим первостепенное значение приобретает информация об уровнях загрязнения, а также характере и интенсивности ответной реакции растительных объектов. При этом в большей степени интерес представляет изучение древесных растений, поскольку, являясь многолетниками, они длительное время испытывают воздействие различных антропогенных факторов и рекомендуются для исследования достаточно больших по площади территорий, в то время как травянистые в большей степени отражают микробиотопические условия произрастания [4, с. 37].

На территории г. Минска достаточно широко представлены насаждения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), участвующие в очищении атмосферы, распределении и ассимиляции загрязняющих веществ. Следует отметить, что сосна обыкновенная относится к наиболее чувствительным индикаторам качества окружающей среды [10; 15; 18]. К распространенным объектам исследования качества среды можно отнести и листовые породы [14] деревьев, например березу повислую (*Betula pendula* Roth) [1], липу мелколистную (*Tilia cordata* (L.) Mill.) [2] и др.

Анализ стабильности развития и физиолого-биохимические характеристики ассимиляционного аппарата хвойных при разных уровнях аэротехногенных нагрузок и в разных климатических условиях представлены в ряде публикаций [2; 6; 11], однако для Беларуси подобные работы фрагментарны [7], а планомерные исследования отсутствуют, что и обусловило актуальность нашей работы.

Цель исследования заключалась в изучении изменений морфолого-анатомических характеристик, а также спектральных характеристик хвои в условиях антропогенной

© Хох А. Н., Звягинцев В. Б., 2021

нагрузки с различным по интенсивности автотранспортным и промышленным воздействием.

Материал и методы исследований

Объектами исследования послужили сосновые насаждения Первомайского (с удовлетворительной экологической ситуацией) и Партизанского (с преимущественно напряженной ситуацией, обусловленной негативными факторами — высоким уровнем загрязнения воздуха и почв, угнетением растительности [3, с. 28]) районов города Минска. В качестве контроля (условно чистая территория) были взяты деревья сосны, произрастающие на территории государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник» (далее — ББЗ).

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°39'30.6" 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

На каждой площадке наблюдения отбор хвои 2-го года жизни проводился с ветвей 1-го порядка в нижней части по всему диаметру кроны 15-ти деревьев в конце вегетационных сезонов 2012 и 2019 гг. (по 30 пар с каждого дерева). Отобранные образцы сканировались на планшетном сканере с разрешением 1200 dpi. Затем по отсканированным изображениям с помощью программы MCview (LOMO-Microsystems, РФ) рассчитывались длина и ширина каждой хвоинки с точностью до 0,01 мм. Измерения толщины хвои, длины и толщины центрального цилиндра, ширины устьиц, а также определение расположения и подсчеты количества смоляных каналов делались на поперечных срезах в средней части хвои с помощью стереоскопического микроскопа Leica S4E. Подсчет и измерение длины устьиц проводились на верхнем и нижнем эпидермисе хвои. Вес хвои, высушенной в термостате при 105°C до сухого состояния, определялся с точностью до 0,01 г.

Площадь хвоинки определялась по формуле Тирена [20, с. 300]:

$$S = 1,413L \times (1,137a + b), \quad (1)$$

где L — длина; a — ширина; b — толщина.

Для расчета количества устьиц в 1 мм^2 вычислялась длина дуги поперечного сечения хвоинки:

$$l = \sqrt{a^2 + \frac{16b^2}{3}}, \quad (2)$$

где a — ширина; b — толщина.

Количество устьиц в 1 мм² рассчитывалось по формуле:

$$N = N_l / 0,4l, \quad (3)$$

где N_l — количество устьиц, которое было подсчитано под микроскопом; l — длина дуги.

Расчет индекса флуктуирующей асимметрии (далее — ИФА) производился по формуле [17, с. 272]:

$$ИФА = 2 \times |d_L - d_R| / (d_L + d_R), \quad (4)$$

где d_L — длина левой хвоинки в паре; d_R — длина правой хвоинки в паре.

Образцы хвои 2019 г. также изучались с помощью метода ИК-Фурье спектроскопии с использованием хемометрических алгоритмов обработки спектральных данных. ИК-спектры регистрировали на спектрометре Spectrum Two с приставкой НПВО (PerkinElmer, США) в диапазоне 4000—400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Статистическая обработка проводилась с использованием статистических пакетов Microsoft Excel v.10.0, SPSS v.20.0 и The Unscrambler X v.10.4.1. Применялись следующие методы: одномерная описательная статистика для каждого из исследуемых параметров, однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), t-критерий Стьюдента, критерий достоверно значимой разности Тьюки, метод главных компонент (далее — МГК). Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение

О достаточной надежности выборочной оценки, применяемой в проведенных исследованиях при определении средней арифметической величины размерных характеристик хвои, свидетельствует тот факт, что показатель точности опыта не превышал 2%. Проверка нормальности распределения с помощью W-теста Шапиро — Уилка показала, что для каждого из исследуемых параметров $p > 0,05$, т.е. анализируемые данные подчиняются закону нормального распределения.

В таблице 2 представлены данные средних значений морфолого-анатомических параметров хвои на исследованных территориях, полученные в 2019 г.

Таблица 2

Рассчитанные показатели (M — среднее, ±SD — стандартное отклонение)

Показатель	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6 (контроль)
Длина, мм	58,01±9,00**	62,71±15,20	49,85±6,60***	45,45±8,90***	44,76±11,70***	64,85±7,20
Ширина, мм	1,52±0,20	1,58±0,18	1,56±0,22	1,63±0,22*	1,68±0,24*	1,53±0,23
Толщина, мм	0,75±0,12	0,74±0,18	0,74±0,15	0,71±0,21	0,73±0,14	0,78±0,13
Масса 1-й хвоинки, мг	34,29±11,77	34,29±11,23	24,70±15,25**	24,70±8,59**	22,04±12,33***	38,42±11,80
Площадь хвои, мм ²	200,98±37,19**	223,89±62,10	178,65±36,35***	168,51±36,35***	158,87±53,73***	255,68±42,10
Площадь поперечного сечения ($S_{\text{пс}}$), мм ²	1,13±0,24	1,07±0,31	1,06±0,29	1,00±0,36*	0,99±0,30*	1,09±0,26
Площадь центрального цилиндра ($S_{\text{щ}}$), мм ²	0,33±0,09	0,36±0,08	0,47±0,06***	0,45±0,11***	0,45±0,10**	0,33±0,08
$S_{\text{щ}}/S_{\text{пс}}$	0,31±0,12	0,37±0,15	0,48±0,17*	0,54±0,44*	0,50±0,22***	0,33±0,12
Длина устьиц, мкм	60,67±14,01	61,16±10,97	53,54±12,37*	53,67±9,02*	49,84±10,36***	66,96±12,30
Ширина устьиц, мкм	45,27±8,52*	44,62±14,56*	40,64±13,62	34,45±11,79**	32,99±7,07**	42,56±12,81
Количество устьиц, шт./мм ²	87,44±21,05	89,74±19,41	104,97±23,32*	99,89±24,12*	112,19±25,08**	88,14±16,13
Диаметр смоляных каналов, мкм	127,24±18,22*	135,63±35,91*	155,84±43,04*	180,93±22,59***	177,57±30,13***	117,87±19,61
Количество смоляных каналов, шт.	11,10±2,93	11,40±4,12	12,80±3,99*	13,20±3,03*	12,50±2,05*	10,60±2,07

Примечание: * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, *** $p \leq 0,001$, уровень значимости рассчитан по сравнению с контролем; здесь и далее пункты 1—6 соответствуют обозначениям в таблице 1.

Сравнительный анализ исследуемых сосновых насаждений показал, что для сосны обыкновенной, произрастающей на территории Березинского биосферного заповедника, характерна более длинная хвоя с большей площадью ее поверхности: на 7% длиннее и на 17% больше, чем в Первомайском районе г. Минска; на 31% длиннее и 34% больше по сравнению с Партизанским районом. Уменьшение длины и площади хвои может представлять собой ответную реакцию сосны обыкновенной на неблагоприятное воздействие окружающей среды, что способно привести к снижению аккумулирующей способности фитоценоза [8, с. 99]. В результате ранее проведенных нами исследований установлено, что большая длина хвои устойчиво сохраняется в местах лучшего обеспечения растений [12, с. 90]. По ширине и площади поперечного сечения хвои, а также длине, ширине и количеству устьиц статистически значимые различия по сравнению с контролем выявлены только для Партизанского района: хвоя шире примерно на 8%, а площадь ее поперечного сечения, наоборот, меньше на 8%; устьица хвои сосны, произрастающей в Партизанском районе, на 28% короче и на 18% уже, чем у хвои, произрастающей на территории ББЗ, но количество их в 1 мм² больше примерно на 17%. Выявленные факты свидетельствуют об увеличении эффективности работы устьичного аппарата под действием антропогенной нагрузки, т.е. у деревьев сосны происходит активизация механизмов адаптации для того, чтобы устьица в условиях загрязнения могли выполнять свои основные функции, поскольку нарушения в их работе могут привести к гибели как хвои, так и всего растения. По толщине хвои статистически значимых различий не выявлено. Наибольшие значения площади центрального цилиндра, а также наибольший диаметр смоляных каналов ($0,47 \pm 0,06$ мм² и 180,93 мкм) наблюдаются в точке № 3 (Партизанский район, ул. Герасименко), различия по сравнению с контролем составляют 30% и 35% соответственно. Очевидно, этот факт можно рассматривать как адаптивную реакцию в ответ на загрязнение окружающей среды, в частности хроническое воздействие атмосферных токсикантов. Полученные нами данные согласуются с имеющимися на сегодняшний день [5; 13; 18; 19].

Также в нашем исследовании данные о длине парных хвоинок были использованы для оценки индекса флуктуирующей асимметрии в 2012 и 2019 гг. и изучения закономерностей их изменения в условиях антропогенного воздействия. Полученные результаты представлены на рисунках 1 и 2.

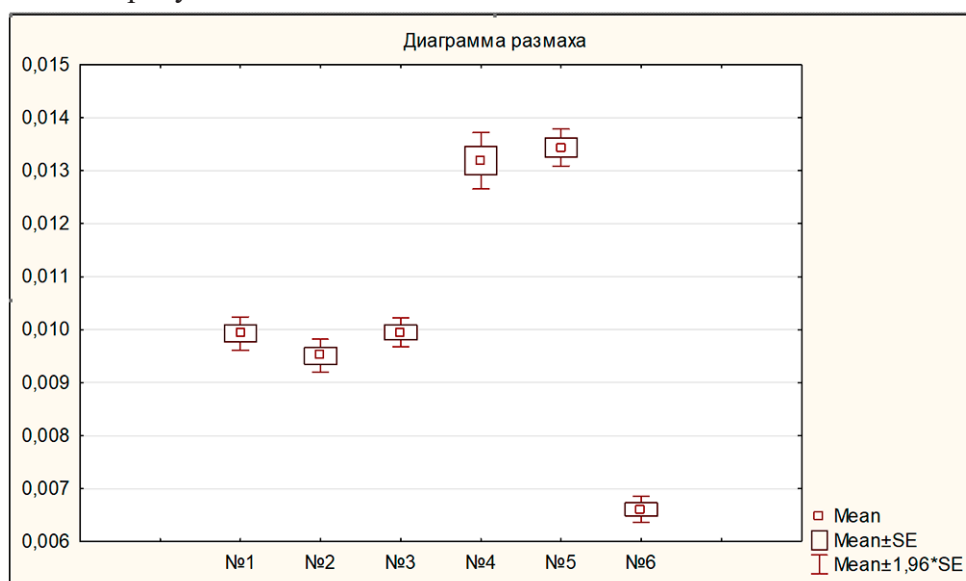


Рис. 1. Диаграмма размахов, отображающая разницу в значении флуктуирующей асимметрии между исследованными сосновыми насаждениями в 2012 году

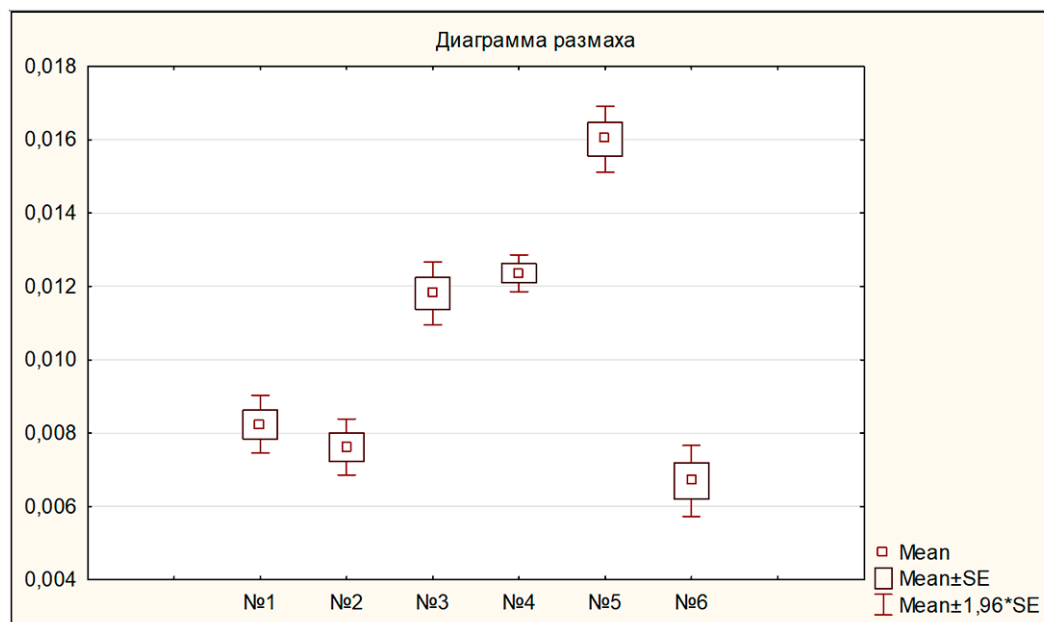


Рис. 2. Диаграмма размахов, отображающая разницу в значении флуктуирующей асимметрии между исследованными сосновыми насаждениями в 2019 году

Наиболее высокие значения индекса флуктуирующей асимметрии как в 2012, так и в 2019 г. отмечаются на ул. Долгобродской в Партизанском районе г. Минска: в среднем его величина составила $0,0124 \pm 0,0039$ и $0,0135 \pm 0,0045$ (за 7 лет произошло увеличение ИФА на 8%). Минимальные значения данного показателя выявлены у исследованных деревьев на территории ББЗ: $0,0065 \pm 0,0017$ и $0,0068 \pm 0,0021$ соответственно (ИФА увеличился на 4%). В целом для данных территорий значительной зависимости ИФА от года исследования не наблюдается, что может быть следствием либо достаточно постоянного уровня воздействия неблагоприятных антропогенных факторов, либо инертности ответной реакции исследуемых деревьев. При этом за истекший период установлено снижение индекса флуктуирующей асимметрии на ул. Всехсвятской и Вересковой Первомайского района (на 21 и 25%), а также на 13% на ул. Ваупшасова Партизанского района, что свидетельствует об уменьшении уровня антропогенной нагрузки. В отношении ул. Герасименко выявлено ухудшение качества среды произрастания сосновых древостоев. Так, в 2019 г. ИФА на данной территории по сравнению с 2012 г. увеличился на 13%.

Однофакторный дисперсионный анализ ANOVA показал значительные различия между исследуемыми группами ($F = 17,44, P = 0,00$ (в 2012 г.); $F = 69,27, P = 0,00$ (в 2019 г.)). Для того чтобы определить, какие именно места отбора значимо различаются между собой, выполняли множественные сравнения с использованием апостериорного теста Тьюки, который позволяет избежать потери статистической мощности (табл. 3).

Таблица 3

Результат теста Тьюки между сравниваемыми парами (точками отбора) сосны обыкновенной

Сравниваемые пары	2012 г.			2019 г.		
	Tukey HSD Q statistic	Tukey HSD p-value	Достоверность различий	Tukey HSD Q statistic	Tukey HSD p-value	Достоверность различий
№ 1 и № 2	3,636	0,116	не значимы	1,693	0,816	не значимы
№ 1 и № 3	1,555	0,872	не значимы	4,503	0,024	* $p < 0,05$
№ 1 и № 4	8,199	0,001	** $p < 0,01$	9,508	0,001	** $p < 0,01$
№ 1 и № 5	9,008	0,001	** $p < 0,01$	18,949	0,001	** $p < 0,01$

Продолжение табл. 3

Сравниваемые пары	2012 г.			2019 г.		
	Tukey HSD Q statistic	Tukey HSD p-value	Достоверность различий	Tukey HSD Q statistic	Tukey HSD p-value	Достоверность различий
№ 1 и № 6	6,188	0,001	** p < 0,01	4,121	0,050	не значимы
№ 2 и № 3	2,867	0,336	не значимы	9,176	0,001	** p < 0,01
№ 2 и № 4	6,565	0,001	** p < 0,01	11,201	0,001	** p < 0,01
№ 2 и № 5	7,225	0,001	** p < 0,01	20,642	0,001	** p < 0,01
№ 2 и № 6	5,182	0,005	** p < 0,01	2,485	0,498	не значимы
№ 3 и № 4	6,848	0,001	** p < 0,01	2,025	0,683	не значимы
№ 3 и № 5	7,508	0,001	** p < 0,01	11,466	0,001	** p < 0,01
№ 3 и № 6	4,900	0,010	** p < 0,01	9,968	0,001	** p < 0,01
№ 4 и № 5	3,143	0,238	не значимы	9,441	0,001	** p < 0,01
№ 4 и № 6	11,747	0,001	** p < 0,01	11,993	0,001	** p < 0,01
№ 5 и № 6	12,407	0,001	** p < 0,01	21,434	0,001	** p < 0,01

В результате установлено, что в 2012 г. между контролем и всеми остальными исследуемыми объектами имеются значимые различия. В 2019 г. различия между контролем и объектами № 1—2 (Партизанский район) отсутствовали, что свидетельствует об улучшении экологической ситуации в районе.

Следующим этапом проводимого нами исследования явилось изучение особенностей воздействия антропогенной нагрузки на спектральные характеристики хвойных растений.

Установлено, что существенных изменений в интенсивности ИК-полос поглощения хвои как фонового (№ 6), так и антропогенных (№ 1—5) пунктов сбора не обнаружено, в связи с чем в работе не проводился сравнительный анализ характеристических групп, которые соответствуют различным типам соединений. Отметим только, что в ИК-спектрах образцов хвои второго года жизни из зоны с высокой антропогенной нагрузкой (№ 5) наблюдается увеличение интенсивности полос поглощения со временем по сравнению с контролем (рис. 3).

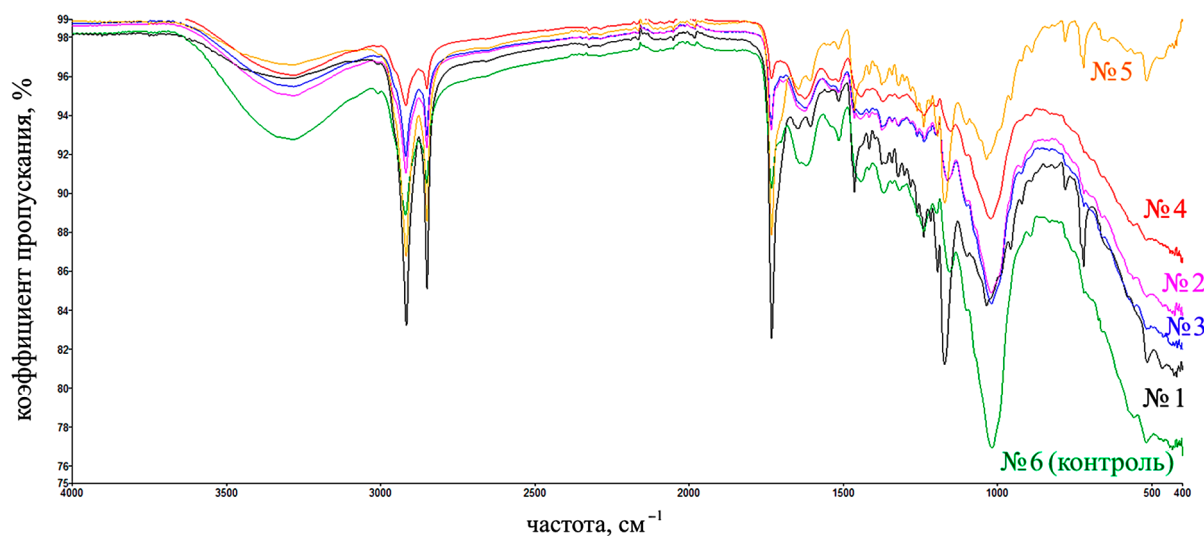


Рис. 3. ИК-спектры сравниваемых образцов хвои фонового (№ 6) и антропогенных (№ 1—5) пунктов сбора

С учетом рассмотренных данных был проведен анализ всех полученных нами ИК-спектров (всего 4500) с применением метода главных компонент. В результате обнаружено, что спектры образуют два обособленных кластера. Так, на графике счетов в координатах ГК1—ГК3 (ГК — РС — главная компонента) отчетливо видно, что образцы хвой из ББЗ и Первомайского района и образцы из Партизанского района четко отделены друг от друга и не перекрываются между собой (рис. 4).

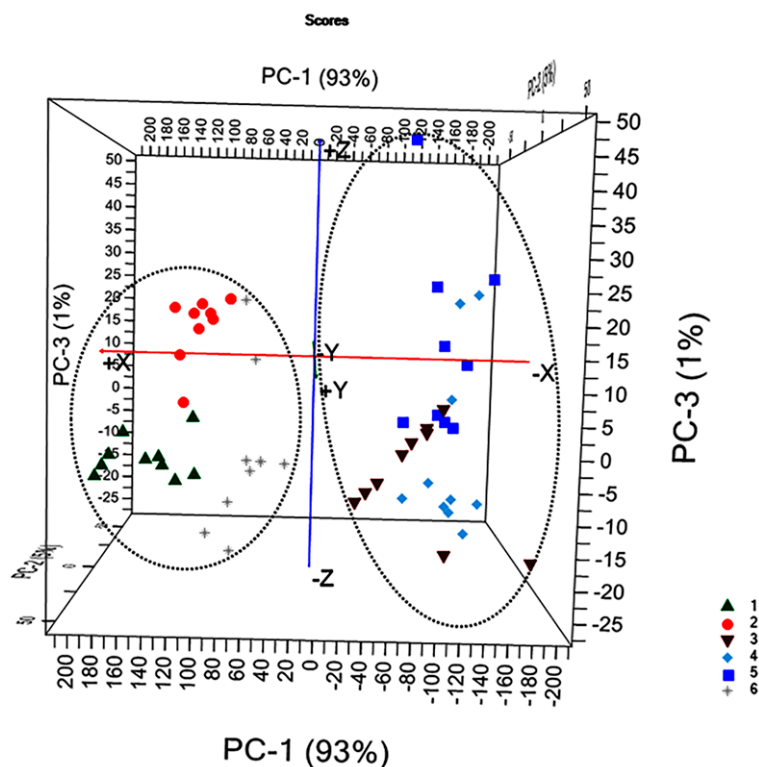


Рис. 4. График счетов в МГК модели: 1 — Первомайский, Всехсвятская; 2 — Первомайский, Вересковая; 3 — Партизанский, Герасименко; 4 — Партизанский, Ваупшасова; 5 — Партизанский, Долгобродская; 6 — Березинский биосферный заповедник, Домжеричское

Далее рассматривались диагностические характеристики построенной нами модели. Так, на рисунке 5 представлена карта Хотеллинга [16]. Ее анализ позволяет сделать вывод о том, что, поскольку все исследуемые образцы находятся в левом нижнем квадранте графика, полученная модель не содержит в себе грубых промахов (погрешностей).

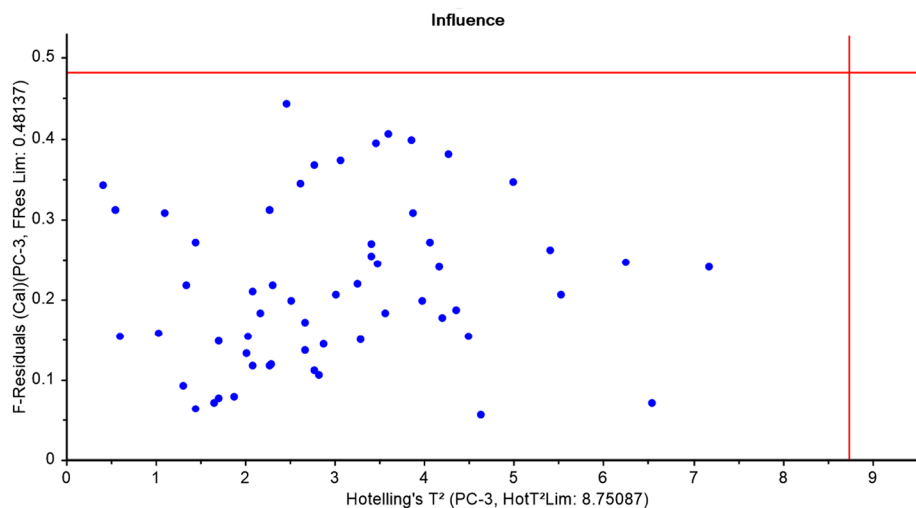


Рис. 5. График статистики Хотеллинга

На рисунке 6 представлен график объясненной дисперсии, позволяющий оценить количество используемой полезной информации. Как можно видеть, обе кривые, взятые как для построения (красная), так и для проверки (синяя), стремятся к значению, равному 100%, т.е. для построения классификационной модели была использована практически вся полезная информация.

Проведенный анализ изменения спектральных характеристик хвои подтвердил результаты морфолого-анатомического анализа, а также результаты, полученные при изучении флуктуирующей асимметрии.

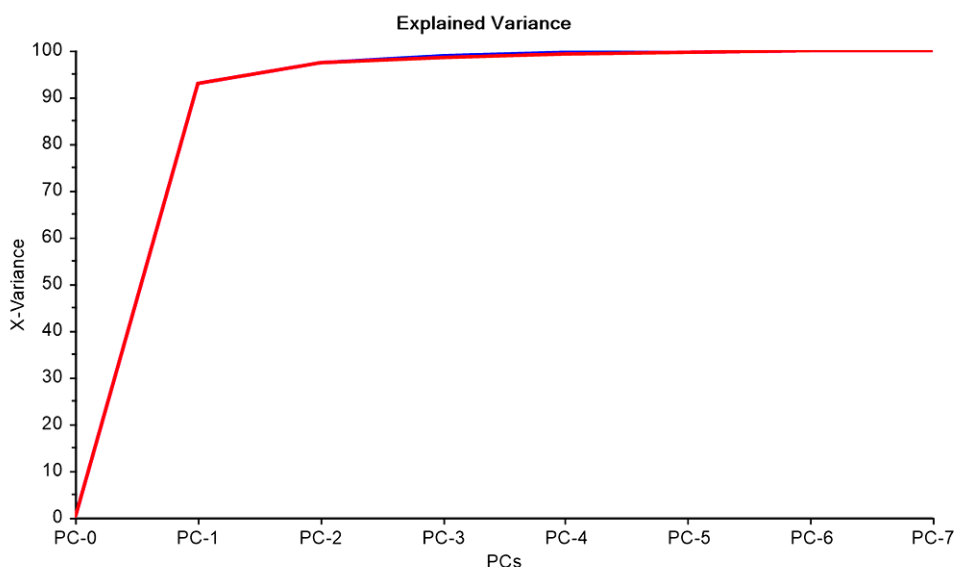


Рис. 6. График объясненной дисперсии

Заключение

В ходе исследования выявлено, что в условиях антропогенного загрязнения для сосны обыкновенной характерно изменение морфолого-анатомической структуры хвои. Сравнительный анализ показал, что максимальное количество изменений по сравнению с контролем (13 из 14 исследованных параметров) характерно для Партизанского района г. Минска, характеризующегося неблагоприятной экологической обстановкой; для Первомайского района число таких изменений составило от 2 до 4. В Партизанском районе выявлено и увеличение изменчивости билатеральных признаков хвои. Так, средний индекс флуктуирующей асимметрии здесь выше на 22% по сравнению с Первомайским районом и на 54% по сравнению с контролем (ББЗ). Полученные данные подтверждает тот факт, что ассимиляционный аппарат сосны обыкновенной весьма чувствителен к изменению условий произрастания негативного характера, а антропогенное загрязнение городской среды оказывает существенное влияние на его анатомо-морфологические перестройки. Метод ИК-Фурье спектроскопии, использованный в работе, в сочетании со статистическими методами анализа многофакторных зависимостей позволил уверенно решить классификационную задачу, связанную с установлением принадлежности образцов с аналогичной антропогенной нагрузкой к одному классу. Полагаем, что проведенные исследования в целом подтверждают, что морфолого-анатомические и спектроскопические методы, используемые в работе, дают возможность надежно выявлять антропогенные воздействия, связанные с загрязнением мест произрастания сосны обыкновенной, а потому могут быть рекомендованы для биоиндикации уровня загрязнения городской среды.

Работа выполнена в рамках задания 3.2.01 «Разработка новых подходов к судебно-экспертному исследованию объектов растительного происхождения» по государ-

ственной программе научных исследований «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Научное обеспечение безопасности человека, общества и государства» (№ госрегистрации 20160444).

Список использованной литературы

1. Бугров С. В., Бугрова С. В. Статистическая оценка взаимосвязи эколого-морфологических показателей березы повислой (*Betula pendula* Roth) с условиями ее произрастания в городах Самарской области [Электронный ресурс] // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2020. Т. 35, № 3. С. 17—29. URL: http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2_35_2020.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2020.35.2.
2. Варлам И. И., Казарцева К. В., Русак С. Н. Сезонные изменения пигментного состава хвойных растений в условиях урбозко систем северных территорий (на примере *Pinus sibirica*) // Безопасный Север — чистая Арктика : сб. науч. тр. по материалам I Всерос. науч.-практ. конф. Сургут : Сургут. гос. ун-т, 2018. С. 117—120. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11082.
3. Городская среда: геоэкологические аспекты / под ред. В. С. Хомича. Минск : Беларуская навука, 2013. 301 с.
4. Здоровье среды : методика оценки / под общ. ред. В. М. Захарова. Москва : Центр экологической политики России, 2000. 68 с.
5. Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Методика комплексной биоиндикационной оценки устойчивости древесных растений к техногенному загрязнению на урбанизированных территориях // Сибирский лесной журнал. 2019. № 6. С. 27—38. DOI: 10.15372/SJFS20190604.
6. Рахматуллина И. Р., Рахматуллин З. З., Исхаков Ф. Ф., Серова О. В. Динамика вегетационного индекса NDVI насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях загрязнения уфимского промышленного центра // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 2. С. 106—117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09.
7. Сергейчик С. А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде // Экологический вестник. 2013. Т. 23, № 1. С. 89—97. DOI: 10.24855/biosfera.v7i4.123.
8. Сибиркина А. Р. Особенности содержания цинка, стронция и марганца в органах и тканях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) соснового бора Семипалатинского Прииртышья (Республика Казахстан) // Вестник Ишимского государственного педагогического института им. П. П. Ершова. 2014. № 4. С. 97—100.
9. Суслина М. А., Сунцова Л. Н. Оценка экологического состояния окружающей среды г. Красноярск по интегральным характеристикам асимметрии листьев липы мелколистной (*Tilia cordata*) // Технология и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск : Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 75—78.
10. Туманик Н. В. Сравнительная оценка воздействия условий городской среды на хвою *Pinus sylvestris* L. в разных районах г. Новосибирска // Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. Уфа : Науч.-издат. центр «Вестник науки», 2019. С. 54—60.
11. Усольцев В. А. Продуктивность ассимиляционного аппарата лесообразующих видов в климатических градиентах Евразии // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 52—65. DOI: 10.15372/sjfs20170405.
12. Хох А. Н., Шалабода В. Л. Сравнительная оценка анатометрических параметров хвои сосны обыкновенной в разных типах леса // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Сер. Естественные науки. 2019. Т. 117, № 6. С. 85—90.
13. Цандекова О. Л. Анатомо-морфологические особенности хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях Кедровского угольного разреза // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 1—6.
14. Чуйков Ю. С., Шадманова Т. Х. Оценка качества городской среды по состоянию тополя черного (*Populus nigra*) // Естественные науки. 2012. № 4 (41). С. 48—58.
15. Alaoui H. A. A., Ozer Genc S., Aricak B., Kuzmina N., Menshikov S., Cetin M. The possibility of using Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles as biomonitor in the determination of heavy metal accumulation // Applied ecology and environmental research. 2020. Vol. 18, N 2. P. 3713—3727. DOI: 10.1007/s11356-020-08449-1.
16. Kessler W., Kessler R. A Handy Tool for Chemometrics: The Unscrambler X // Scientific Computing. 2010. Vol. 27, N 4. 13 p.

17. Kozlov M. V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Ecological indicators. 2002. Vol. 1, N 4. P. 271—277. DOI: 10.1016/S1470-160X(02)00023-7.
18. Nikolić M. B., Stefanović M., Vasinović M. M., Milanović S. D., Mladenović K. D., Mitrović S. Ž., Eremija S. M., Rakonjac L. Needle morpho-anatomy and pollen morpho-physiology of selected conifers in urban conditions // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17, N 2. P. 2831—2848. DOI: 10.15666/aer/1702_28312848.
19. Ozturk M., Coskuner K. A., Usta Y., Serdar B., Bilgili E. The effect of mistletoe (*Viscum album*) on branch wood and needle anatomy of Scots pine (*Pinus sylvestris*) // IAWA journal. 2019. Vol. 40, N 2. P. 352—365. DOI: 10.1163/22941932-40190219.
20. Tiren L. Über die Grösse der Nadelfläche einiger Kiefernbestände // Mitteilungen aus der forstlichen Versuchs-Anstalt Schwedens. 1927. H. 23. S. 295—336.

Поступила в редакцию 21.11.2020

Хох Анна Николаевна, аспирант

Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь
Республика Беларусь, 220114, Минск, ул. Филимонова, 25

E-mail: 1ann1hoh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4633-0163

Звягинцев Вячеслав Борисович, кандидат биологических наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет

Республика Беларусь, 220006, Минск, ул. Свердлова, 13а

E-mail: mycolog@tut.by

ORCID: 0000-0002-2530-4655

UDC 574.21:582.475.4(476-25)

A. N. Khokh

V. B. Zvyagintsev

Influence of anthropogenic pollution on morphological-anatomical parameters and spectral characteristics of Scots pine needles

The research paper demonstrates a comprehensive comparative analysis of the state of coniferous plantations in Minsk in areas with a favourable and predominantly unfavourable ecological situation and control trees growing in relatively clean territories. The morphological-anatomical and bilateral (in terms of fluctuating asymmetry) patterns of needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) change were revealed, reflecting the severity of anthropogenic press on the urban environment. The possibility of using the FTIR spectroscopy method combined with chemometric analysis algorithms for the differentiation of needles is shown. Using the method of principal components, the test samples were divided into clusters reflecting the extent of their anthropogenic load.

Key words: Scots pine, needles, morphological-anatomical parameters, fluctuating asymmetry, FTIR spectroscopy, anthropogenic factors, Minsk.

Khokh Anna Nikolaevna, Postgraduate Student

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

The Republic of Belarus, 220114, Minsk, Philimonova str., 25

E-mail: 1ann1hoh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4633-0163

Zviagintsev Viacheslav Borisovich, PhD (Biology), Assistant Professor

Belarusian State Technological University

The Republic of Belarus, 220006, Minsk, Sverdlova str., 13a
 E-mail: mycolog@tut.by
 ORCID: 0000-0002-2530-4655

References

1. Bugrov S. V., Bugrova S. V. Statisticheskaya otsenka vzaimosvyazi ekologo-morfologicheskikh pokazatelei berezy povisloi (*Betula pendula* Roth) s usloviyami ee proizrastaniya v gorodakh Samarskoi oblasti [Statistical assessment of the correlation between growth conditions of *Betula pendula* Roth and its ecological and morphological parameters in the cities of the Samara region]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Elektronnyi nauchnyi zhurnal — Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2020, no. 3 (35), pp. 17—29. Available at: http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2_35_2020.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2020.35.2. (In Russian)
2. Varlam I. I., Kazartseva K. V., Rusak S. N. Sezonnnye izmeneniya pigmentnogo sostava khvoynykh rastenii v usloviyakh urboekosistem severnykh territorii (na primere *Pinus sibirica*) [Seasonal changes in the pigment composition of conifers in the urban ecosystems of the northern territories (on the example of *Pinus sibirica*)]. *Bezopasnyi Sever — chistaya Arktika: sbornik nauch. trudov po materialam I Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Safe North — clean Arctic. Collect. of sci. works based on the materials of the I All-Russia sci.-pract. conf.]. Surgut, Surgut. gos. un-t Publ., 2018, pp. 117—120. DOI:10.24411/1816-1863-2019-11082. (In Russian)
3. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 301 p. (In Russian)
4. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Environmental health: assessment method]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 301 p. (In Russian)
5. Klad'ko Yu. V., Skripal'shchikova L. N. Metodika kompleksnoi bioindikatsionnoi otsenki ustoichivosti drevesnykh rastenii k tekhnogennomu zagryazneniyu na urbanizirovannykh territoriyakh [Methods of complex bioindicative assessment of life state patterns of woody plants under industrial pollutions on urbanized territories]. *Sibirskii lesnoi zhurnal — Siberian Journal of Forest Science*, 2019, no. 6, pp. 27—38. DOI: 10.15372/SJFS20190604. (In Russian)
6. Rakhmatullina I. R., Rakhmatullin Z. Z., Iskhakov F. F., Serova O. V. Dinamika vegetatsionnogo indeksa NDVI nasazhdenii sosny obyknovЕННОй (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyakh zagryazneniya ufmskogo promyshlennogo tsentra [Dynamics of the NDVI vegetation index of pine forest plantations (*Pinus sylvestris* L.) under pollution in industrial center of Ufa]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika — Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Development*, 2019, no. 2, pp. 106—117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09. (In Russian)
7. Sergeichik S. A. Ekologo-fiziologicheskii monitoring ustoichivosti assimilyatsionnogo apparata sosny obyknovЕННОй (*Pinus sylvestris* L.) v tekhnogennoi srede [Ecological and physiological monitoring of the stability of the assimilation apparatus of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the technogenic environment]. *Ekologicheskii vestnik*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 89—97. DOI: 10.24855/biosfera.v7i4.123. (In Russian)
8. Sibirskina A. R. Osobennosti sodержaniya tsinka, strontsiya i margantsa v organakh i tkanyakh sosny obyknovЕННОй (*Pinus sylvestris* L.) osnovnogo bora Semipalatinskogo Priirtysh'ya (Respublika Kazakhstan) [Peculiarities of the content of zinc, strontium and manganese in organs and tissues of the Pine (*Pinus sylvestris* L.) in pine forest of the Irtysh river in Semipalatinsk (the Republic of Kazakhstan)]. *Vestnik Ishimskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo instituta im. P. P. Ershova*, 2014, no. 4, pp. 97—100. (In Russian)
9. Suslina M. A., Suntova L. N. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchei sredy g. Krasnoyarska po integral'nym kharakteristikam asimmetrii list'ev lipy melkolistnoi (*Tilia cordata*) [Assessment of the ecological state of the environment of Krasnoyarsk by the integral characteristics of the asymmetry of the leaves of the small-leaved linden (*Tilia cordata*)]. *Tekhnologiya i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva: sbornik statei Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Technology and equipment for garden and park and landscape construction. Proceed. of the All-Russia sci.-pract. conf.]. Krasnoyarsk, Sibirskii gos. un-t nauki i tekhnologii im. akad. M. F. Reshetneva Publ., 2019, pp. 75—78. (In Russian)
10. Tumanik N. V. Sravnitel'naya otsenka vozdeistviya uslovii gorodskoi sredy na khvoyu *Pinus sylvestris* L. v raznykh raionakh g. Novosibirsk [Comparative assessment of the impact of urban environment conditions on the needles of *Pinus sylvestris* L. in different districts of Novosibirsk]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: innovatika v sovremennom mire: sbornik statei mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Fundamental and Applied Scientific Research: Innovation in the Modern World. Collect. of articles of the Internat. sci.-pract. conf.]. Ufa, Nauch.-izdat. tsentr "Vestnik nauki" Publ., 2019, pp. 54—60. (In Russian)

11. Usol'tsev V. A. Produktivnost' assimilyatsionnogo apparata lesoobrazuyushchikh vidov v klimaticheskikh gradientakh Evrazii [Foliage efficiency of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia]. *Sibirskii lesnoi zhurnal — Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 4, pp. 52—65. DOI: 10.15372/sjfs20170405. (In Russian)
12. Khokh A. N., Shalaboda V. L. Sravnitel'naya otsenka anatomicheskikh parametrov khvoi sosny obyknovnoy v raznykh tipakh lesa [Comparative assessment of the anatomical parameters of pine needles in different types of forests]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. Ser. Estestvennye nauki — Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*, 2019, vol. 117, no. 6, pp. 85—90. (In Russian)
13. Tsandekova O. L. Anatomico-morfologicheskie osobennosti khvoi Pinus sylvestris L. v usloviyakh Kedrovskogo ugol'nogo razreza [Anatomic-morphological features of pine needles of Pinus sylvestris L. in the conditions of the Kedrovsky coal cut]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 3, pp. 1—6. (In Russian)
14. Chuikov Yu. S., Shadmanova T. Kh. Otsenka kachestva gorodskoi sredy po sostoyaniyu topolya chernogo (Populus nigra) [Quality assessment of urban environment by the condition of black poplar (Populus nigra)]. *Estestvennye nauki — Natural Sciences. Journal of Fundamental and Applied Researches*, 2012, no. 4 (41), pp. 48—58. (In Russian)
15. Alaçouri H. A. A., Ozer Genc C., Aricak B., Kuzmina N., Menshikov S., Cetin M. The possibility of using Scots pine (Pinus sylvestris L.) needles as biomonitor in the determination of heavy metal accumulation. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 3713—3727. DOI: 10.1007/s11356-020-08449-1.
16. Kessler W., Kessler R. A Handy Tool for Chemometrics: The Unscrambler X. *Scientific Computing*, 2010, vol. 27, no. 4, 13 p.
17. Kozlov M. V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (Pinus sylvestris). *Ecological indicators*, 2002, vol. 1, no. 4, pp. 271—277. DOI: 10.1016/S1470-160X(02)00023-7.
18. Nikolić M. B., Stefanović M., Vasinović M. M., Milanović S. D., Mladenović K. D., Mitrović S. Ž., Eremija S. M., Rakonjac L. Needle morpho-anatomy and pollen morpho-physiology of selected conifers in urban conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 2831—2848. DOI: 10.15666/aer/1702_28312848.
19. Ozturk M., Coskuner K. A., Usta Y., Serdar B., Bilgili E. The effect of mistletoe (Viscum album) on branch wood and needle anatomy of Scots pine (Pinus sylvestris). *IAWA journal*, 2019, vol. 40, no. 2, pp. 352—365. DOI: 10.1163/22941932-40190219.
20. Tiren L. Über die Grösse der Nadelfläche einiger Kiefernbestände. *Mitteilungen aus der forstlichen Versuchs-Anstalt Schwedens*, 1927, H. 23, S. 295—336.