






ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ *TILIA CORDATA* MILL. В ГРАДИЕНТЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ Г. ВЛАДИКАВКАЗ

Елена Борисовна Мамиева¹ ✉ elena.mamiewa@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7211-9137>

Лариса Владимировна Ширнина² ilgis@lesgen.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2035-7157>

Валентина Трофимовна Попова³ bot.fiz-rast@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

¹Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова, г. Владикавказ

²ФГБУ «Всероссийский НИИ лесной генетики, селекции и биотехнологии»

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Исследование количественного содержания пигментов в листьях липы мелколистной, растущей в линейных посадках вдоль автодорог, проведено на 10 участках транспортной сети столицы республики Северная Осетия г. Владикавказ. Участки расположены в промышленной зоне города, на разном расстоянии от стационарных источников загрязнения воздушной среды. Оценивалось комплексное влияние всех источников загрязнения с уровнем индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) от 2,0 до 6,4. Выбор объектов исследований и отбор образцов для анализа проведены методами Е.В. Николаевской, Н.П. Красинского, А.К. Фролова. Содержание пигментов (хлорофиллы «а», «б»; каротиноиды) в листьях липы определяли фотометрическим методом В.Ф. Гавриленко и др. Концентрацию пигментов определяли на фотокалориметре ФЭК-56. Статистическую обработку данных проводили методами биологической статистики В.Ф. Лакина. Количество зеленых пигментов в листьях липы мелколистной неодинаково, уровень их концентрации повышается в условиях наиболее высокого уровня загрязнения воздуха. Ведущую роль в работе фотосинтезирующего аппарата играет хлорофилл «а», содержание которого определяет общую картину совместного их содержания с хлорофиллом «б». Изменения хлорофиллов и их суммарного количества аналогично изменению содержания каротиноидов. Анализ полученных материалов показал, что в районах с высоким ИЗА количественное содержание пигментов повышается, что согласуется с результатами одних исследователей (Тарабрин, Рачковская, Ким), однако не подтверждают другие (Аксенова, Казанцева, Цандекова Неверова), что может быть вызвано индивидуальной видовой реакцией растений. Толщина тканей листа снижается по мере увеличения загрязнения, соотношение столбчатого и губчатого мезофилла смещается в сторону губчатого, что негативно будет сказываться на процессе фотосинтеза.

Ключевые слова: пигменты, анатомо-морфологические особенности, липа мелколистная, индекс загрязнения атмосферы, техногенное загрязнение среды

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Мамиева, Е. Б. Оценка устойчивости фотосинтетического аппарата липы мелколистной *Tilia Cordata* mill. в градиенте техногенного загрязнения г. Владикавказ / Е. Б. Мамиева, Л. В. Ширнина, В. Т. Попова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 30–42. – Библиогр.: с. 39–42 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/3>.

Поступила: 25.05.2022 **Принята к публикации:** 28.06.2022 **Опубликована онлайн:** 01.07.2022

STABILITY EVALUATION OF PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF *TILIA CORDATA* MILL. IN THE GRADIENT OF TECHNOGENIC POLLUTION IN VLADIKAVKAZ

Elena B. Mamieva¹ ✉ elena.mamieva@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7211-9137>

Larisa V. Shirnina² ilgis@lesgen.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2035-7157>

Valentina T. Popova³ bot.fiz-rast@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

¹ North Ossetian State University after Kosta Levanovich Khetagurov, Vladikavkaz

² FSBI Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology

³ FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation

Abstract

The study of the quantitative content of pigments in the leaves of small-leaved linden growing in linear plantings along roads was carried out on 10 sections of the transport network of the capital of the Republic of North Ossetia in Vladikavkaz. The sites are located in the industrial zone of the city, at different distances from stationary sources of air pollution. The complex impact of all sources of pollution with the level of the atmospheric pollution index (API) from 2.0 to 6.4 was assessed. The choice of research objects and sampling for analysis were carried out by the methods of E.V. Nikolaevskaya, N.P. Krasinsky, A.K. Frolova. The content of pigments (chlorophylls "a", "b"; carotenoids) in linden leaves was determined by the photometric method of V.F. Gavrilenko et al. The concentration of pigments was determined on a FEK-56 photocalorimeter. Statistical data processing was carried out using the methods of biological statistics by V.F. Lakin. The amount of green pigments in the leaves of small-leaved linden is not the same, the level of their concentration increases under conditions of the highest level of air pollution. The leading role in the work of the photosynthetic apparatus is played by chlorophyll "a", the content of which determines the overall picture of their joint content with chlorophyll "b". Changes in chlorophylls and their total amount are similar to changes in the content of carotenoids. An analysis of the obtained materials showed that in areas with a high API, the quantitative content of pigments increases, which is consistent with the results of some researchers (Tarabrin, Rachkovskaya, Kim), but not confirmed by others (Aksenova, Kazantseva, Tsandekova Neverova), which may be caused by an individual species reaction plants. The thickness of the leaf tissue decreases with increasing pollution, the ratio of columnar and spongy mesophyll shifts towards spongy, which will negatively affect the process of photosynthesis.

Keywords: pigments, anatomical and morphological features, small-leaved linden, air pollution index, technogenic environmental pollution.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Mamieva E.B., Shirnina L.V., Popova V.T. (2022) Stability evaluation of photosynthetic apparatus of *Tilia cordata* mill. in the gradient of technogenic pollution in Vladikavkaz. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 2 (46), pp. 30-42 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/3>.

Received: 25.05.2022 **Revised:** 25.06.2022 **Accepted:** 28.06.2022 **Published online:** 01.07.2022

Введение

Неповрежденная структура ассимиляционных тканей, количественное содержание и соотношение пигментов зеленых растений являются обязательными условиями продуктивности, мор-

фогенеза и фотопериодизма растений. Влияние внешних факторов среды, включая техногенное воздействие, вызывает изменение структуры листа и, как следствие, повышение или снижение роста, развития растений, энергетических процес-

сов фотосинтеза. Древесные растения являются основой формирования экологического каркаса, комфортной среды населенных пунктов. Часть древесных пород являются широко распространенными, встречаются в озеленении городов. Среди видов, которые можно встретить во многих населенных пунктах, липа мелколистная – встречается в озеленении Красноярска [13], Санкт-Петербурга [9], Ижевска [6], Екатеринбурга [1] и других городов. Широкая интродукция приводит к смене климато-экологических условий вида, что в совокупности с техногенным давлением приводит к изменению биологической реакции организма. Изучение данного аспекта жизнедеятельности растений является важным для выявления пределов норм реакций, границ устойчивости к климатическим или техногенным факторам.

Цель исследований – оценка изменения содержания пигментов, толщины мезофилла и эпидермиса, площади поверхности листьев деревьев липы мелколистной, произрастающих в линейных посадках вдоль улиц г. Владикавказ, в зависимости от уровня техногенного загрязнения.

В задачи работы входили: определение содержания хлорофилла («а» и «б») и каротиноидов, толщины тканей в листьях липы в градиенте аэротехногенного загрязнения.

Объекты исследований. Стационарные наблюдения проведены в промышленной зоне города и на примыкающих к ней улицах, в центральной части правобережья р. Терек. Общий уровень загрязнения среды аэротехногенными выбросами в разных пунктах учетов и на улицах с разной нагрузкой автотранспорта приведен на рис. 1 и в табл. 1. Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) приведен в соответствии с Государственным докладом [5].

Материал и методы

Исследования были проведены в столице республики Северная Осетия-Алания, г. Владикавказе. Выбор объектов и отбор образцов для анализа проводили по методам Е.В. Николаевской, Н.П. Красинского, А.К. Фролова [7, 12, 19]. В линейных посадках липы (*Tilia L.*) одного возраста, по случайно выбранным линиям или с использованием таблиц случайных чисел, на каждом 5-м и 10-м внешне здоровом дереве отбирали по 50 листьев, из расчета «дерево-повторность». Учеты и наблюдения, а также отбор проб для изучения влияния загрязнения воздушной среды на пигменты проведены с использованием статистической выборки. В течение четырех лет всего было отобрано 120 модельных деревьев и проведен анализ 10 000 листьев.

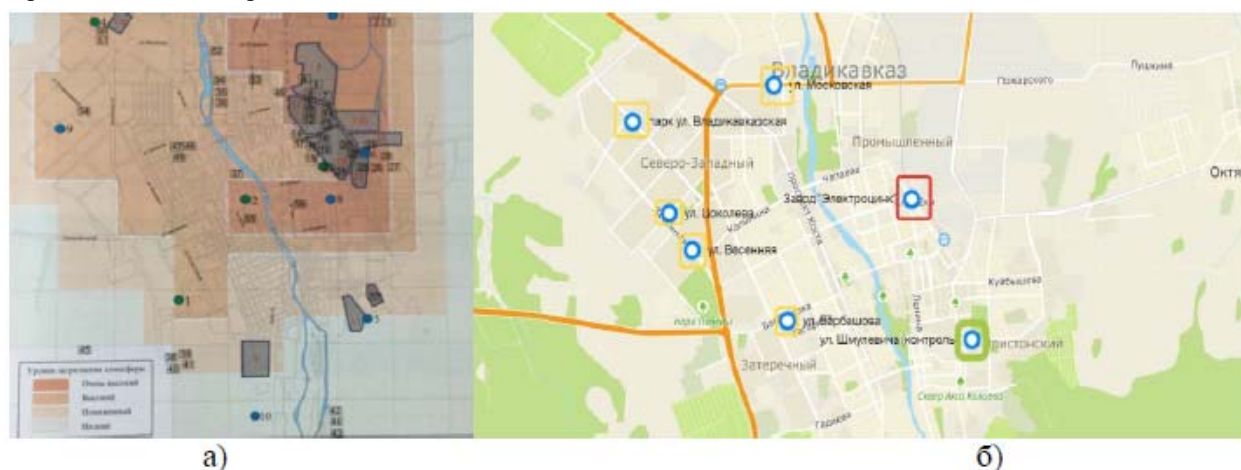


Рис. 1. а) Зоны загрязнения воздушной среды г. Владикавказ выбросами предприятий: I – ОАО «Электроцинк», II – ОАО «Победит», III – Вагоноремонтный завод, IV – ОАО «Магнит», V – ОАО «Осетинский завод автотракторного электрооборудования», VI – завод «Бином», VII – АО «Крон», VIII – ОАО «Топаз», IX – ОАО «Иристонстекло», X – ОАО «Владикавказский завод «Электротрактор» [5]; б) расположение мест проведения исследований, красным – ИЗА – 6,4; желтым – ИЗА – от 3 до 6; зеленым – ИЗА от 2 до 2,9

Figure 1. a) Zones of air pollution of Vladikavkaz by emissions of enterprises: I – JSC Elektrozink, II - JSC Pobedit, III - Car repair Plant, IV - JSC Magnit, V - JSC Ossetian Plant of automotive electrical Equipment, VI - plant Binom, VII - JSC Kron", VIII - JSC "Topaz", IX - JSC "Iristeklo", X - JSC "Vladikavkaz Plant "Electrotractor" [State Report 2007]; b) location of research sites, red – ISA – 6,4; yellow – ISA – from 3 to 6; green – ISA from 2 to 2,9

Таблица 1
Характеристика загрязненности пунктов
обследования

Table 1
Characteristics of contamination of survey points

№ участка № territory	Наименование объекта Name of the object	ИЗА ISA	Уровень загрязнения Pollution level
1	ул. Шмудевича (контроль) Shmulevich (control)	2,0	Низкий
2	ул. Горького Gorkova str.	3,8	Средний
4	ул. Чкалова	4,6	Средний
5	Поликлиника завода «Электроцинк» Polyclinic of the factory "Electrozink"	5,1	Высокий
6	ул. Джанаева Janaeva st.	5,4	Высокий
3	ул. Куйбышева Kuibyshev str.	5,4	Высокий
7	Черменское шоссе Chermenskoe highway	6,4	Очень высокий
8	Завод «Электроцинк», отвалы factory "Electrozink" heap	6,4	Очень высокий

Для количественного определения пигментов использовали фотометрический метод [4]. Пигменты экстрагировали из свежего материала – по 50 листьев в 12 вариантах (всего 600 листьев).

Концентрацию пигментов в вытяжке определяли на фотоэлектроколориметре ФЭК-56. Оптическую плотность (D) определяли при длинах волн, соответствующих максимумам определяемых пигментов. Расчет вели по формулам

$$C_a = 13.70 \times D_{665} - 5.76 \times D_{649} \quad (1)$$

$$C_b = 25.80 \times D_{649} - 7.60 \times D_{665} \quad (2)$$

$$C_{a+b} = 6.10 \times D_{665} + 20.04 \times D_{649} = 25.1 \times D_{654} \quad (3)$$

$$C_{кар} = 4.695 \times D_{440.5} - 0,68 (C_{a+b}) \quad (4)$$

$$C \times V \quad (5)$$

$$A = P \times 100, \quad (6)$$

где

D – оптическая плотность;

C – концентрация пигментов в мг/л;

V – объем вытяжки пигментов в мл;

A – содержание пигментов в свежем растительном материале, мг/г веса.

Состав и количество пигментов определяли в лаборатории физиологии НПО «Горное» совместно с сотрудницей лаборатории А.Х. Тебловой.

С модельных деревьев случайным образом отбирали по пятьдесят листьев, материал помещали в 95 % этиловый спирт. Обработку материала проводили по стандартной анатомической методике [16]. Статистическая обработка данных проведена методами биологической статистики [8], с использованием методов сравнения средних значений по критериям Стьюдента и Фишера, дисперсионного и корреляционного анализов.

Результаты и обсуждение.

Содержание пигментов в листьях липы мелколистной в условиях разного уровня загрязнения атмосферы

Полученные в результате измерений концентрации пигментов в вытяжке и в пересчете на вес свежего растительного материала представлены в табл. 2, рис. 2. Определение содержания пигментов в листьях липы мелколистной (рис. 3, табл. 2, 3), произрастающей в условиях разного уровня загрязнения атмосферы выбросами металлургического завода, других промышленных предприятий и автотранспорта, показало следующее.

Содержание двух форм хлорофилла и каротиноидов варьирует сходным образом, вне зависимости от степени техногенной нагрузки. Количество хлорофилла «а», наиболее активно работающего в реакционных центрах светособирающих комплексов в процессе фотосинтеза [3], во всех вариантах в 3-4 раза превышает содержание хлорофилла «б», что согласуется с материалами, полученными в г. Кемерово [18], но противоречит данным из Калининградской области для клена остролистного [11], свидетельствующим о резком снижении содержания хлорофилла «а» на загрязненных участках городской среды. Суммарное количество обеих форм хлорофилла колеблется в пределах 4,607-7,279 мг/л, и оно более чем в 2 раза превышает содержание каротиноидов.

Содержание пигментов в листьях липы мелколистной в условиях разного уровня загрязнения атмосферы

Table 2

The content of pigments in the leaves of small-leaved linden in conditions of different levels of atmospheric pollution

Постоянные и временные пробные площадки (на улицах) Permanent and temporary trial areas (on the streets)	ИЗА ISA	Концентрация пигментов, мг/л вытяжки Pigment concentration, mg/l of extract				Содержание пигментов, мг/г свежего растительного материала Pigment content, mg/g of fresh plant material			
		Ка	Кб	Ка+б	Ккар,	Са	Сб	Са+б	Скар,
Завод «Электроцинк» Electrozink Factory	6,4	4,705	1,074	5,779	1,770	2,990	0,682	3,673	1,125
Барбашова Barbashova	5,7	3,853	1,072	4,926	1,548	2,064	0,574	2,639	0,829
Барбашова (двор) Barbashova courtyard	5,5	4,204	0,902	5,104	1,613	2,741	0,586	3,328	1,052
Московская Moscow's	5,3	3,698	0,909	4,607	1,507	2,746	0,674	3,42	1,119
Московская (двор) Moscow's courtyard	5,3	3,761	0,897	4,658	1,418	2,636	0,628	3,269	0,993
Цоколаева (у дороги) Tsokolaeva (by the road)	5,3	6,144	1,135	7,279	2,444	3,268	0,603	2,860	0,914
Весенняя Vesennya	4,0	5,134	1,198	6,332	1,894	3,080	0,718	3,799	1,136
Владикавказская (парк) Vladikavkaz's (park)	3,7	5,831	1,038	6,868	2,431	3,101	0,552	3,653	1,293
Цоколаева (вдоль трассы) Tsokolaeva (by the road)	3,7	3,874	0,767	4,641	1,629	2,090	0,414	2,504	0,876
Цоколаева (двор) Tsokolaeva (courtyard)	3,5	3,924	1,078	5,002	1,359	2,802	0,77	3,573	0,9701
Шмудевича Shmulevich	2,2	4,311	1,067	5,378	1,718	2,468	0,610	3,079	0,983
Шмудевича (контроль) Shmulevich (control)	2,0	4,656	1,079	5,735	2,059	2,267	0,525	2,793	1,002

Примечание: к – концентрация; а, б – формы хлорофилла; кар. – каротиноиды; С – содержание
 Note: к – concentration; а, б – forms of chlorophyll; кар. – caratinoids; С – content

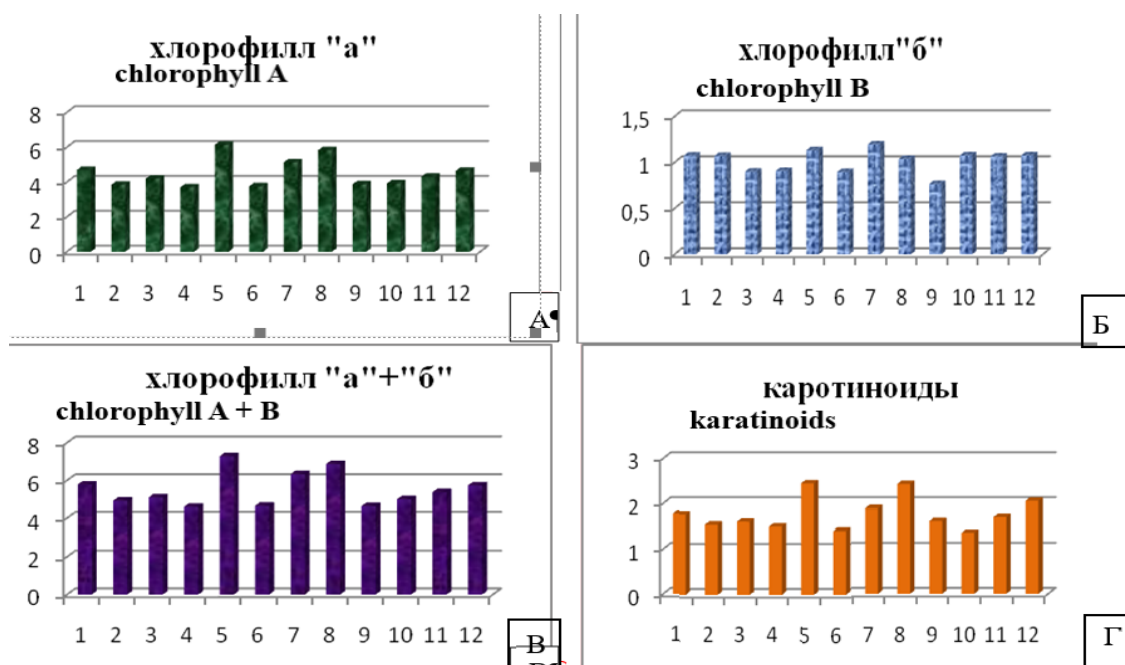


Рис. 2. Содержание пигментов в листьях липы в градиенте загрязнения атмосферного воздуха г. Владикавказа; 1-12 уровень загрязнения ИЗА от 6,4 до 2,0

Figure 2. The content of pigments in linden leaves in the gradient of atmospheric air pollution in Vladikavkaz; 1-12 IZA pollution level from 6.4 to 2.0

Судя по данным рис. 2, вероятно, ведущую роль в работе фотосинтезирующего аппарата играет хлорофилл «а», определяющий общий вид гистограммы (рис. 2, В). Высокие положительные коэффициенты корреляции между ИЗА и содержанием пигментов (по сравнению с контролем, в %) отмечены в вариантах: содержание каротиноидов в вытяжках из листьев, соотношение «хлорофилл «а» – каротиноиды» и соотношение «обе формы хлорофилла – каротиноиды». При среднем и высоком уровне техногенного загрязнения (ИЗА $\geq 4,0$) регистрируется достоверный рост этих показателей на 19,8-20,4 %, что может послужить целям биоиндикации.

Несмотря на изменчивость количества зеленых пигментов в листьях на урбанизированных территориях, исследователи отмечают увеличение общего уровня содержания хлорофилла под влиянием повышенной степени загрязнения воздуха [11, 14, 19]. Существует и противоположное мнение о снижении у древесных растений общего количества пигментов при наиболее высоком уровне загрязнения, в частности суммарного количества хлорофиллов «а» и «б» [2] и пигментного комплекса в листьях ряда древесных растений [19], а также о разрушении пигментов при высокой концентрации загрязнения воздушной среды тяжелыми металлами [14, 19]. По некоторым данным [10, 11], с ростом уровня загрязнения городской среды идет более активное накопление антоциановых пигментов в листьях липы мелколистной.

Такой разброс данных о влиянии техногенных загрязнений на состав и количественное содержание пигментов в листьях липы и других растений свидетельствует о том, что вопрос о направлении и степени реакции пигментов на загрязнение среды довольно сложен и требует дальнейших исследований для выявления связи этих показателей с конкретными условиями, и последующего обобщения всех материалов для установления общих закономерностей, а также необходимостью определения пороговых значений поллютантов, при которых происходит смена эффекта воздействия: со стимуляции к разрушению.

Определение пигментов в листьях липы мелколистной, произрастающей в условиях разного уровня загрязнения атмосферы выбросами преимущественно автотранспорта показало, что последние больше сказываются на содержании каротиноидов, чем хлорофилла (табл. 2). Но в любом случае содержание всех пигментов обратно пропорционально уровню загрязнения.

Анализ соотношения форм различных пигментов показал, – высокая степень загрязнения выбросами автотранспорта отрицательно влияет на соотношение двух форм хлорофилла (ул. Барбашова с ИЗА – 5,7), но несколько увеличивает показатели соотношения хлорофилла с каротиноидами. Однако соотношение хлорофилла «а» и «б» в варианте на участке высокого загрязнения атмосферы на ул. Пожарского и на участке парка по ул. Владикавказской повышается в сравнении с контролем. Эта позиция требует продолжения исследований с целью определения причины.

Исследование анатомо-морфологических особенностей проводили для точек сбора контрастных по величине ИЗА: 6,4 очень высокий, 5,7 высокий, 5,3 высокий, 3,7 средний, 2,0 низкий.

Одним из важных показателей нормально развивающегося фотосинтетического аппарата является толщина листовой пластинки. На поперечных срезах листьев четко видно их дорзивентральное строение. Листья состоят из следующих тканей: верхнего и нижнего эпидермиса, столбчатого и губчатого мезофилла, пронизанного сетью жилок. Палисадная ткань под верхним эпидермисом однослойна, отмечается переходные по форме и ориентированности клетки. Сложена плотное с небольшими межклетниками.

Губчатая ткань из 3–4 слоев изодиаметрических или вытянутых параллельно плоскостям листа клеток. Межклетники крупные и составляют по площади 10–14% губчатой ткани. Клетки эпидермиса с криволинейными или волнистыми стенками. Устьица аномоцитного типа (классификация Барановой) развиваются на абаксиальной поверхности.

В условиях разного техногенного загрязнения отмечаются различия в толщине листовой пластинки. Эта величина мало меняется в условиях среднего уровня загрязнения (ИЗА 3,7), она

снижается лишь на 8–9%, однако при высоком загрязнении (ИЗА 5,3–5,7) общая толщина листа уменьшается уже более чем на 30%, оставаясь в этих пределах и при очень высокой степени ИЗА (табл. 3). Наиболее сильно реагируют на изменение техногенного загрязнения клетки палисадной ткани. Высота паренхимы в контроле составляет 101,5 мкм, при среднем уровне меняется незначительно, а в вариантная с высоким и очень высоким уровнем загрязнения снижается на 30–40% и составляет всего 61,5 мкм. Изменение высоты губчатой ткани происходит в меньшей степени. Можно только отметить, что в условиях очень высокого уровня загрязнения губчатый мезофилл получил более слабое развитие. Его толщина снижается 78,9 мкм до 69,7 мкм.

Исследование анатомо-морфологических особенностей проводили для точек сбора контрастных по величине ИЗА: 6,4 очень высокий, 5,7 высокий, 5,3 высокий, 3,7 средний, 2,0 низкий.

Одним из важных показателей нормально развивающегося фотосинтетического аппарата является толщина листовой пластинки. На поперечных срезах листьев четко видно их дорзивентральное строение. Листья состоят из следующих тканей: верхнего и нижнего эпидермиса, столбчатого и губчатого мезофилла, пронизанного сетью жилок. Палисадная ткань под верхним эпидермисом однослойна, отмечается переходные по форме и ориентированности клетки. Сложена плотное с небольшими межклетниками.

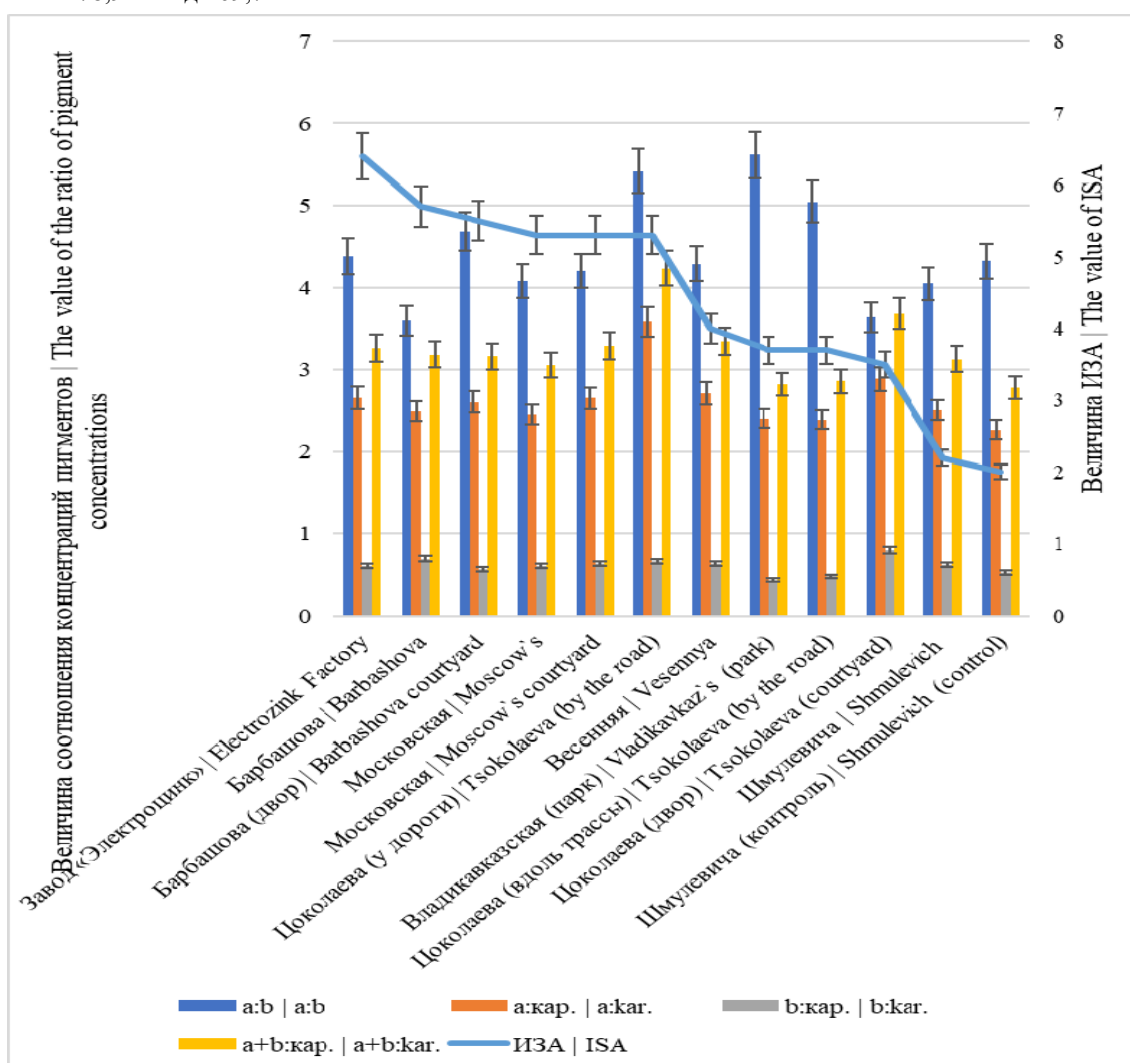


Рис. 3. Диаграмма зависимости величины соотношения разных пигментов от ИЗА
 Figure 3. Diagram of the dependence of the ratio of different pigments

Гистогенез тканей листа липы мелколистной в условиях атмосферного загрязнения г. Владикавказ

Table 3

Histogenesis of small-leaved linden leaf tissues under conditions of atmospheric pollution in Vladikavkaz

№	Пробные площади (на улицах) Trial areas (on the streets)	ИЗА ISA	Общая толщина листа, мкм Total leaf thickness, mkm	Толщина мезофилла, мкм Mesophyll thickness, mkm		Отношение столбчатой/губчатой Columnar/Spongy ratio	Толщина эпидермиса, мкм Thickness of the epidermis, mkm	
				Столбчатая Columnar	Губчатая Spongy		Верхняя Upper	Нижняя Lower
1	Завод «Электроцинк» Electrozink Factory	6,4 очень высокий	152,3 ± 2,07	61,5 ± 1,1	69,7 ± 1,7	0,88	13,1±	12,3±
2	Барбашова Barbashova	5,7 высокий	154,0 ± 1,4	66,1 ± 1,2	69,3 ± 1,3	0,95	13,6±	12,9±
3	Московская Moscow's	5,3 высокий	157,78 ± 1,9	74,7 ± 1,5	72,1 ± 1,7	1,04	14,1±	13,1±
4	Цокалева Tsokolaeva	3,7 средний	206,9 ± 2,0	91,8 ± 1,7	75,5 ± 1,4	1,22	16,8±	14,5±
5	Шмулевича (контроль) Shmulevich (control)	2,0 низкий	225,4 ± 2,11	101,5 ± 1,8	78,9 ± 1,6	1,29	17,1±	14,8±

Губчатая ткань из 3–4 слоев изодиаметрических или вытянутых параллельно плоскостям листа клеток. Межклетники крупные и составляют по площади 10–14 % губчатой ткани. Клетки эпидермиса с криволинейными или волнистыми стенками. Устьица аномоцитного типа (классификация Барановой) развиваются на абаксиальной поверхности.

В условиях разного техногенного загрязнения отмечаются различия в толщине листовой пластинки. Эта величина мало меняется в условиях среднего уровня загрязнения (ИЗА 3,7), она снижается лишь на 8–9 %, однако при высоком загрязнении (ИЗА 5,3–5,7) общая толщина листа уменьшается уже более чем на 30 %, оставаясь в этих пределах и при очень высокой степени ИЗА (табл. 3). Наиболее сильно реагируют на изменение техногенного загрязнения клетки палисадной ткани. Высота паренхимы в контроле составляет 101,5 мкм, при среднем уровне меняется незначительно, а в вариантная с высоким и очень высоким уровнем загрязнения снижается на 30–40% и составляет всего 61,5 мкм. Изменение высоты губчатой ткани происходит в меньшей степени.

Можно только отметить, что в условиях очень высокого уровня загрязнения губчатый мезофилл получил более слабое развитие. Его толщина снижается 78,9 мкм до 69,7 мкм.

Гораздо более показательным является отношение толщины палисадной ткани к толщине губчатой. В условиях низкого и среднего уровня загрязнения этот показатель больше 14,0. С увеличением загрязнения показатель коэффициент уменьшается и становится меньше единицы. Реагирует на уровень загрязнения и толщина эпидермы, особенно верхней величина которой снижается с 17,1 мкм по 13,1 мкм.

Подробный структурный анализ всех тканей листа при разном уровне техногенного загрязнения показывает, что размеры клеток всех изучаемых тканей изменяются в зависимости от величины ИЗА.

Таким образом, адаптация липы мелколистной к техногенному загрязнению достигается разнообразными путями, в том числе перестройкой на анатомическом уровне. Основные изменения при очень высоком и высоком уровне загрязнения происходят в столбчатом мезофилле, вели-

чина которого значительно сокращается, что, несомненно, оказывается на ассимиляционной деятельности растения. Критическим порогом чувствительности липы мелколистной к загрязнению среды можно назвать ИЗА равной 5,3.

В целом липа мелколистная в условиях разной степени загрязнения показывает устойчивость фотосинтетического аппарата, сохраняя количественное содержания пигментов. Однако их соотношение может изменяться, указывая на реакцию организма в ответ на увеличение воздействия неблагоприятных факторов. Кроме этого, толщина тканей листа снижается по мере увеличения загрязнения, соотношение столбчатого и губчатого мезофилла смещается в сторону губчатого, что негативно будет сказываться на процессе фотосинтеза.

Фотосинтетические пигменты, входящие в пигментно-белковый комплекс, наряду с водным режимом растений являются параметрами, реагирующими на стресс [20]. Водный стресс значительно влияет на морфофизиологические характеристики, такие как содержание хлорофилла и каротиноидов, содержание сенозидов и экспрессию генов [21]. Рассматриваемые нами параметры могут являться маркерами воздействий разного рода, применяются для большого числа растений и факторов воздействия, включая новые

источники антропогенного загрязнения, такие как микропластик [22].

Выводы

1. Содержание двух форм хлорофилла (а и б) и каротиноидов варьирует независимо от степени техногенной нагрузки, но сходным образом.

2. При среднем и высоком уровне техногенного загрязнения (ИЗА \geq 4,0) регистрируется достоверный рост содержания каротиноидов в вытяжках из листьев, а также соотношения «хлорофилл «а» – каротиноиды» и «обе формы хлорофилла – каротиноиды» на 19,8-20,4 %.

3. Полученные результаты могут использоваться для формирования баз данных реакций древесных растений в целях биоиндикационных исследований атмосферного техногенного загрязнения среды.

4. Основные изменения фотосинтетического аппарата при очень высоком и высоком уровне загрязнения происходят в столбчатом мезофилле, величина которого значительно сокращается, что, несомненно, сказывается на ассимиляционной деятельности растения. Критическим порогом чувствительности липы мелколистной к загрязнению среды можно назвать ИЗА, равный 5,3.

5. Площадь поверхности листовых пластинок липы мелколистной по мере возрастания загрязнения воздуха снижается (табл. 4).

Таблица 4

Площадь листьев липы мелколистной в разных условиях загрязнения

Table 4

The area of the leaves of small-leaved linden in different pollution conditions

№	Пробные площади (на улицах) Trial areas (on the streets)	ИЗА ISA	S листа, см ² S leaf sm ²	Боковой побег, см Side shoot, cm	Масса, г Weight, g
1	Завод «Электроцинк» Electrozink Factory	6,4	30,56	24,60	0,236
2	Барбашова Barbashova	5,7	30,17	24,18	0,230
3	Московская Moscow`s	5,3	32,15	24,41	0,250
4	Цокалева Tsokolaeva	3,7	34,71	36,83	0,278
5	Шмулевича (контроль) Shmulevich (control)	2,0	41,83	34,71	0,308

Список литературы

1. Агафонова, А. Л., Аткина, Л. И., Агафонова, Г. В. Санитарное состояние посадок липы мелколистной на центральных улицах г. Екатеринбурга. Леса России и хозяйство в них - 2008. - № 1-30. - С. 75-78. – *Библиогр.: с. 78 (2 назв.)*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sanitarnoe-sostoyanie-posadok-lipy-melkolistnoy-na-tsentralnyh-ulitsah-g-ekaterinburga> (дата обращения: 19.05.2022).
2. Аксенова, С.В., Казанцева М.Н. Загрязнение городской среды, как фактор негативного влияния на древесные растения. Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития: Материалы III междунар. науч.-практ. конф.– Ишим, 2008. – С. 11-14. – *Библиогр.: с. 14*.
3. Боннер Дж., Варнер Дж. Биохимия растений: пер. с англ. М.: Изд-во «Мир», 1968. – 624 с.
4. Гавриленко В. Ф., Гусев М. В., Никитина К. А., Хоффман П. Главы физиологии растений. 1986. 186 с.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды и природных ресурсов РСО-Алания за 2006 год». Владикавказ, 2007. С. 6-10.
6. Ермолаев И. В., Сидорова О. В. Особенности повреждения липы мелколистной липовой молью-пестрянкой (*Phyllonorycter issikii*, *Lepidoptera*, *Gracillariidae*) в городе Ижевске. Зоологический журнал. 2012. Т. 91. № 3. С. 310. *Библиогр.: с. 310 (1 назв.)*.
7. Красинский, Н. П. Методы изучения газоустойчивости растений. Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые сорта. Горький-Москва, 1950. С. 260-274.
8. Лакин, Г. Ф. Биометрия: учебное пособие для биол. специальностей вузов: 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 1980. 293 с.
9. Лисицына А. А., Ковязин В. Ф. Санитарное состояние насаждений липы мелколистной в парках Санкт-Петербурга. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2011. № 28. С. 181-184. *Библиогр.: с. 184 (2 назв.)*.
10. Майдебурга И. С., Чупахина Г. Н. Состояние пигментной системы древесных растений в различных районах Калининграда. Роль ботанических садов в сохранении и обогащении биологического разнообразия видов : тезисы Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию Ботанического сада КГУ г. Калининграда (Калининград, 14-18 сентября 2004 г.). Калининград : КГУ, 2004. С. 212-214. – *Библиогр.: с. 214*.
11. Майдебурга, И. С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо-морфологические и биохимические показатели древесных растений : специальность 03.00.16 – «Экология» : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Майдебурга Ирина Сергеевна, Российский государственный университет имени Иммануила Канта. Калининград, 2006. 22 с.
12. Николаевская, Е. В. Некоторые методы изучения изменчивости количественных анатомических и морфологических признаков строения растения. Владикавказ, 1999. 156 с.
13. Параскевопуло М. Ф., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Изучение пигментного состава листьев липы мелколистной в условиях техногенного загрязнения города Красноярск. Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона: материалам межрегиональной научно-практической конференции школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 28-31. *Библиогр.: с. 31*.
14. Рачковская М. М., Ким Л. О. Фитобиоиндикация состояния окружающей среды. Вопросы экологии и охраны природы. Кемерово, 1979. С. 127–139.
15. РД 52.04.667-2005: Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию: утв. Заместителем Руководителя Росгидромета и введен в действие 2006-02-01. М.: Росгидромет, 2006.

16. Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы : справочник / Р. П. Барыкина [и др.] ; под ред. Р. П. Барыкиной. М.: Изд-во МГУ, 2004 - 312 с.
17. Тарабрин, В. П. Устойчивость древесных растений в условиях промышленного загрязнения окружающей среды : специальность 03.00.12 «Физиология и биохимия растений» : автореф. дис. ... д-ра биол наук / Тарабрин Виктор Павлович, Киев, 1974. 54 с.
18. Фролов, А. К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем / А. К. Фролов. Санкт-Петербург : Наука, 1988. 157 с.
19. Цандекова О. Л., Неверова О. А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений. Изв. Самарского науч. центра РАН. Самара: Научный центр РАН. 2010. Т. 12. № 1-3. С. 853-856. *Библиогр.: с. 855–856 (13 назв.)*.
20. Navarro A., Nicastro N., Costa C. et al. Sorting biotic and abiotic stresses on wild rocket by leaf-image hyperspectral data mining with an artificial intelligence model. *Plant Methods*. 2022. 18(1). doi:10.1186/s13007-022-00880-4
21. Nilofer Srivastava Y, Kumar A, Khare P, Singh A. K, Singh S. Variation in morphophysiological responses and differential expression of sennoside biosynthesis pathway genes under water stress in *Cassia angustifolia* vahl. *Ind Crops Prod*. 2022. 184. 10.1016/j.indcrop.2022.115047
22. Menicagli V., Castiglione M. R., Balestri E. et al. Early evidence of the impacts of microplastic and nanoplastic pollution on the growth and physiology of the seagrass *cymodocea nodosa*. *Sci Total Environ*. 2022. 838. 10.1016/j.scitotenv.2022.156514.

References

1. Agafonova, A. L., Atkina, L. I., Agafonova, G. V. Sanitary condition of small-leaved linden plantings on the central streets of Yekaterinburg / A. L. Agafonova, L. I. Atkina, G. V. Agafonova // *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* [Forests of Russia and the economy in them]. - 2008. - №1-30. – S. 75-78. – Bibliogr.: s. 78 (2 nazv.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sanitarnoe-sostoyanie-posadok-lipy-melkolistnoy-na-tsentralnyh-ulitsah-g-ekaterinburga> (data obrashcheniya: 19.05.2022) (in Russian).
2. Aksenova, S.V., Kazanceva M.N. Urban pollution as a factor of negative impact on woody plants / S.V. Aksenova, M.N. Kazanceva // *Urboekosistemy: problemy i perspektivy raz-vitiya: Materialy III mezhdunar. nauch.-prakt. konf.– Ishim* [Urban ecosystems: problems and prospects of development: Materials of the III International Scientific and Practical Conference.], 2008. – p. 11-14. – Bibliogr.: p. 14. (in Russian).
3. Bonner, Dzh., Varner, Dzh. Biohimiya rastenij: per. s angl. [Plant biochemistry] / Dzh. Bonner, Dzh. Varner, M.: Izd-vo «Mir», 1968. – 624 p. (in Russian).
4. Gavrilenko, V.F., Gusev, M.V., Nikitina, K.A., Hoffman, P. Glavy fiziologii rastenij [Chapters of Plant Physiology] / V.F. Gavrilenko, M.V. Gusev, K.A. Nikitina, P.M. Hoffman, 1986. - 186 p. (in Russian).
5. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy i prirodnyh resursov RSO-Alaniya za 2006 god» [On the state and protection of the Environment and natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania for 2006]. Vladikavkaz, 2007. - p. 6-10. (in Russian).
6. Ermolaev, I.V., Sidorova, O.V. Features of damage to linden by small-leaved linden moth (*Phyllonorycter issikii*, Lepidoptera, Gracillariidae) in Izhevsk / I.V. Ermolaev, O.V. Sidorova // *Zoologicheskij zhurnal* [Zoological Journal]. - 2012. - Т. 91. - № 3. - p. 310. – Bibliogr.: p. 310 (1 nazv.). (in Russian).
7. Krasinskij, N.P. Metody izucheniya gazoustojchivosti rastenij [Methods of studying the gas resistance of plants] / N.P. Krasinskij // *Dymo-ustojchivost' rastenij i dymoustojchivye assortimenty. Gor'kij-Moskva* [Smoke resistance of plants and smoke-resistant assortment], 1950. - p. 260-274. (in Russian).
8. Lakin, G. F. Biometriya: uchebnoe posobie dlya biol. special'nostej vuzov: 3-e izd., pepepab. i dop. [Biometrics: a textbook for biol. specialties of universities] / G.F. Lakin. - Moskva: Vysshaya shkola, 1980. 293 p. (in Russian).

9. Lisicyna, A.A., Kovyazin, V.F. Sanitary condition of small-leaved linden plantings in St. Petersburg parks / A.A. Lisicyna, V.F. Kovyazin // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forest complex]. - 2011. - № 28. - S. 181-184. – Bibliogr.: p. 184 (2 nazv.). (in Russian).

10. Majdebura, I.S., CHupahina, G.N. Sostoyanie pigmentnoj sistemy drevesnyh rastenij v razlichnyh rajonah Kaliningrada / I.S. Majdebura, G.N. CHupahina [The state of the pigment system of woody plants in various districts of Kaliningrad] // Rol' botanicheskikh sadov v sohranenii i obogashchenii biologicheskogo raznoobraziya vidov: tezisy Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu Bota-nicheskogo sada KGU g. Kaliningrada (Kaliningrad, 14-18 sentyabrya 2004g.) [The role of botanical gardens in the conservation and enrichment of biological diversity of species: theses of the International Scientific Conference, dedicated. The 100th anniversary of the Botanical Garden of KSU Kaliningrad (Kaliningrad, September 14-18, 2004)]. - Kaliningrad: KGU, 2004. - p. 212-214. – Bibliogr.: p. 214. (in Russian).

11. Majdebura, I.S. Vliyanie zagryazneniya vozdušnogo bassejna goroda Kaliningrada na anatomo-morfologicheskie i biohimicheskie pokazateli drevesnyh rastenij: special'nost' 03.00.16 – «Ekologiya»: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [The influence of pollution of the Kaliningrad air basin on anatomical, morphological and biochemical indicators of woody plants] / Majdebura Irina Sergeevna, Rossijskom gosudarstvennom universitete imeni Immanuila Kanta - Kaliningrad, 2006. - 22 p. (in Russian).

12. Nikolaevskaya, E.V. Nekotorye metody izucheniya izmenchivosti kolichestvennyh anatomicheskikh i morfologicheskikh priznakov stroeniya rasteniya [Some methods of studying the variability of quantitative anatomical and morphological signs of plant structure] / E.V. Nikolaevskaya. - Vladikavkaz, 1999. 156 p. (in Russian).

13. Paraskevopulo, M.F., Suncova, L.N., Inshakov, E.M. Izuchenie pigmentnogo sostava list'ev li-py melkolistnoj v usloviyah tekhnogennoho zagryazneniya goroda Krasnoyarska [The study of the pigment composition of small-leaved linden leaves in the conditions of technogenic pollution of the city of Krasnoyarsk] / M.F. Paraskevopulo, L.N. Suncova, E.M. Inshakov // Ekologicheskoe obrazovanie i prirodopol'zovanie v innovacionnom razvitii regiona: materialam mezhhregional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii shkol'nikov, studentov, aspi-rantov i molodyh uchenyh [Environmental education and environmental management in the innovative development of the region: materials of the interregional scientific and practical conference of schoolchildren, students, postgraduates and young scientists.]. - 2016. - p. 28-31. – Bibliogr.: p. 31. (in Russian).

14. Rachkovskaya, M.M., Kim, L.O. Fitobioindikaciya sostoyaniya okruzhayushchej sredy [Bioindication of the state of the environment] / M.M. Rachkovskaya, L.O. Kim // Voprosy ekologii i ohrany prirody. Kemerovo. [Issues of ecology and nature protection] - 1979. – s. 127-139. (in Russian).

15. RD 52.04.667-2005: Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodah dlya informirovaniya gosudarstvennyh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchie trebovaniya k razrabotke, postroe-niyu, izlozheniyu i sodержaniyu [Documents on the state of atmospheric pollution in cities to inform government agencies, the public and the public. General requirements for the development, construction, presentation and content:]; utv. Zamestitelem Rukovoditelya Rosgidrometa i vveden v dejstvie 2006-02-01. M.: Rosgidromet, - 2006. (in Russian).

16. Spravochnik po botanicheskoy mikrotekhnikе. Osnovy i metody : spravochnik [Handbook of Botanical Microtechnics. Basics and methods : Reference] / R.P. Barykina [i dr.]; pod red. R.P. Barykinoy. - M.: Izd-vo MGU, 2004 - 312 p. (in Russian).

17. Tarabrin, V.P. Ustojchivost' drevesnyh rastenij v usloviyah promyshlennogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy [Sustainability of woody plants in conditions of industrial environmental pollution]: special'nost' 03.00.12 «Fiziologiya i biokhimiya rastenij»:avtoref. dis. ... d-ra biol nauk / Tarabrin Viktor Pavlovich, Kiev, 1974. - 54 p. (in Russian).

18. Frolov, A.K. Okruzhayushchaya sreda krupnogo goroda i zhizn' rastenij v nem [The environment of a large city and the life of plants in it] / A.K. Frolov, - SPb: Nauka, 1988. 157 s. (in Russian).

19. Candekova, O.L., Neverova, O.A. Vliyanie vybrosov avtotransporta na pigmentnyj kompleks list'ev drevesnyh rastenij / O.L. Candekova, O.A. Neverova [The effect of vehicle emissions on the pigment complex of leaves of woody plants] // Izv. Samarskogo nauch. centra RAN. Samara: Nauchnyj centr RAN [Izv. of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Samara]. - 2010. - Т. 12. - № 1-3. - S. 853-856. – Bibliogr.: s. 855–856 (13 nazv.). (in Russian).

20. Navarro A., Nicastro N., Costa C. et al. Sorting biotic and abiotic stresses on wild rocket by leaf-image hyperspectral data mining with an artificial intelligence model. *Plant Methods*. 2022. 18(1). doi:10.1186/s13007-022-00880-4

21. Nilofer Srivastava Y, Kumar A, Khare P, Singh A. K, Singh S. Variation in morphophysiological responses and differential expression of sennoside biosynthesis pathway genes under water stress in *Cassia angustifolia* vahl. *Ind Crops Prod*. 2022. 184. 10.1016/j.indcrop.2022.115047

22. Menicagli V., Castiglione M. R., Balestri E. et al. Early evidence of the impacts of microplastic and nanoplastic pollution on the growth and physiology of the seagrass *cymodocea nodosa*. *Sci Total Environ*. 2022. 838. 10.1016/j.scitotenv.2022.156514.

Сведения об авторах

✉ *Елена Борисовна Мамиева* – учебный мастер кафедры физиологии, анатомии и ботаники Северо-Осетинского государственного университета им. Коста Левановича Хетагурова, г. Владикавказ, Северная Осетия-Алания, тел. 89188250731, e-mail: elena.mamiewa@yandex.ru.

Лариса Владимировна Ширнина – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский НИИ лесной генетики, селекции и биотехнологии», г. Воронеж, Российская Федерация, тел. 8 (4732) 53-82-71, e-mail: ilgis@lesgen.vrn.ru

Валентина Трофимовна Попова – заведующая кафедрой ботаники и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, тел. 8 (5732) 53-73-88, e-mail: bot.fiz-rast@yandex.ru.

Information about authors

✉ *Elena Borisovna Mamiewa* – educational master, the Dept. of physiology, anatomy and botany, the North Ossetia state university of a name K. Khetagurova, Vladikavkaz, the North Ossetia-Alania, tel. 89188250731, E-mail: elena.mamiewa@yandex.ru.

Larisa Vladimirovna Shirnina – Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Federal state budgetary institution "All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology", city of Voronezh, Russian Federation, tel. 8 (4732) 53-82-71, E-mail: ilgis@lesgen.vrn.ru

Valentina Nrofimovna Popova – Head of department of botany and plant physiology, FSBEI HE Voronezh State Forest Engineering University named after V.I. G.F. Morozov", tel. 8 (5732) 53-73-88, E-mail: bot.fiz-rast@yandex.ru