

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-874

УДК 581.4:581.151



Научная статья

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛИСТЬЕВ ПОПУЛЯЦИЙ *ACER NEGUNDO* L. В ВЫСОТНОМ ГРАДИЕНТЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА (РЕСПУБЛИКА АДЫГЕЯ)

*Е.М. Еднич, И.В. Чернявская, Т.Н. Толстикова,
М.Н. Хагур, М.В. Алиев*

Обоснование. *Изменчивость морфологической структуры листьев растений дает представление об адаптации и приспособленности растений. Понимание адаптивных стратегий инвазивных видов, в том числе *Acer negundo* L. на основе морфологических механизмов адаптации в высотном градиенте актуально для прогнозирования поведения *A. negundo* в пойменных лесах Адыгеи и послужит основой для дальнейшего изучения инвазибельности *A. negundo* на Северо-Западном Кавказе.*

Цель. *Выявление изменчивости морфологических показателей листа популяций *Acer negundo* L. в высотном градиенте Северо-Западного Кавказа (Республика Адыгея).*

Материалы и методы. *Материалом исследований послужили четыре популяции инвазивного вида *A. negundo*, произрастающих на территории Республики Адыгея (Северо-Западный Кавказ) в пределах от 120 до 600 м н.у.м. Морфологические признаки листа (максимальная длина листовой пластинки, максимальная ширина, угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка) измеряли штангенциркулем с точностью $\pm 0,01$ мм и транспортиром с точностью 1° ; толщину листьев – прибором Тургоромер-1 с измерительной головкой системы ТН10-60Т; вычисление площади листьев – по алгоритмам на языке Python 3.1. Статистический анализ изменчивости морфологических признаков выполнен методами описательной статистики, анализа главных компонент, корреляционного, дисперсионного, кластерного анализов и линейной регрессии с использованием языка программирования Python 3.11.1.*

Результаты. *Внутрипопуляционная изменчивость морфологических показателей листа четырех популяций *A. negundo* в высотном градиенте Севе-*

ро-Западного Кавказа (Республика Адыгея) в пределах от 120 до 600 м н.у.м. находилась на среднем и высоком уровнях.

Межпопуляционная изменчивость морфологических признаков *A. negundo* (максимальная длина, ширина листовой пластинки, индекс листовой пластинки и флуктуирующая асимметрия) имела слабовыраженное влияние высотного градиента. Из всех природно-климатических факторов достоверно влияют на морфологические признаки листа *A. negundo* высота над уровнем моря и количество осадков, что подтверждено результатами линейной регрессии. Методом главных компонент и кластерным анализом были подтверждены морфологические различия в популяциях, наиболее сильно отличающихся по высоте над уровнем моря и количеству осадков.

Заключение. Более высокую изменчивость признаков для популяций *A. negundo* в разных экологических условиях, определяемых высотным градиентом, можно рассматривать как проявление адаптивного морфогенеза, что свидетельствует о высокой экологической пластичности *A. negundo* и способности выдержать влияние изменяющихся факторов среды.

Ключевые слова: морфологическая изменчивость листьев; *Acer negundo*; высотный градиент; Северо-Западный Кавказ; адаптация; инвазивный вид

Для цитирования: Еднич Е.М., Чернявская И.В., Толстикова Т.Н., Хагур М.Н., Алиев М.В. Морфологическая изменчивость листьев популяций *Acer negundo* L. в высотном градиенте Северо-Западного Кавказа (Республика Адыгея) // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16, №4. С. 142-163. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-874

Original article

MORPHOLOGICAL VARIABILITY OF LEAVES OF *ACER NEGUNDO* L. POPULATIONS IN THE ALTITUDINAL GRADIENT OF THE NORTH-WEST CAUCASUS (REPUBLIC OF ADYGEA)

*E.M. Ednich, I.V. Chernyavskaya, T.N. Tolstikova,
M.N. Khagur, M.V. Aliev*

Background. The morphological structure variability of plant leaves gives an idea of plant adaptation. Understanding the adaptive strategies of invasive species, including *Acer negundo* L. based on morphological mechanisms of adaptation in the altitude gradient is relevant for predicting of *A. negundo* behavior in

the floodplain forests of Adygea and will be a basis for further study of *A. negundo* invasiveness in the North-West Caucasus.

Purpose. Identification of the morphological parameters variability of the leaf of *Acer negundo* L. populations in the altitudinal gradient of the North-West Caucasus (The Republic of Adygea).

Materials and methods. Four populations of the invasive species *A. negundo*, growing in the Republic of Adygea territory (North-West Caucasus) at a height of 120 to 600 metres above sea level were the research material. Morphological features of the leaf (maximum length of the leaf blade, maximum width, angle between the central and lateral vein of the upper leaf) were measured with a caliper with an accuracy of ± 0.01 mm and a protractor with an accuracy of 1° ; leaf thickness – by a Turgoromer-1 device with a measuring head of the TN10-60T system; leaf area calculation – using algorithms in Python 3.1. Statistical analysis of the morphological features variability was performed by means of descriptive statistics methods, principal component analysis, correlation analysis, variance and cluster analysis and linear regression with the programming language Python 3.11.1.

Results. Intrapopulation variability of morphological parameters of the four populations leaf of *A. negundo* in the altitudinal gradient of the North-West Caucasus (Republic of Adygea) at a height of 120 to 600 metres above sea level was at medium and high levels.

The interpopulation variability of morphological features of *A. negundo* (maximum length, width of the leaf blade, index of the leaf blade and fluctuating asymmetry) had a weak influence of the altitudinal gradient. Of all the natural and climatic factors, the morphological features of the *A. negundo* leaf are considerably influenced by altitude and precipitation, which is confirmed by the results of linear regression. The morphological differences of the populations most strongly differing in altitude and precipitation were confirmed by the method of principal components and cluster analysis.

Conclusion. The higher variability of traits for populations of *A. negundo* in different environmental conditions determined by the altitudinal gradient can be considered as a manifestation of adaptive morphogenesis, that indicates the high ecological plasticity of *A. negundo* and the ability to withstand the influence of changing environmental factors.

Keywords: leaf morphological variability; *Acer negundo*; altitudinal gradient; North-West Caucasus; adaptation; invasive species

For citation. Ednich E.M., Chernyavskaya I.V., Tolstikova T.N., Khagur M.N., Aliev M.V. Morphological Variability of Leaves of *Acer negundo* L. Populations

in the Altitudinal Gradient of the North-West Caucasus (Republic of Adygea). Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 142-163. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-4-874

Введение

В настоящее время актуальной экологической проблемой является расселение чужеродных видов во вторичном ареале [8]. Их способность проникать в естественные растительные сообщества может приводить к вытеснению автохтонных растений и сокращению биологического разнообразия. Одним из таких агрессивных видов является клен ясенелистный (*A. negundo* L.), включенный в Черную книгу РФ как инвазионный [7; 22; 28].

В работах А.С. Зернова, И.Н. Тимухина, Акатова В.В., Акатовой Т.В. рассматривается высотное распространение чужеродных видов растений в горной части Западного Кавказа [3; 14]. Показаны различия в высотном распространении чужеродных видов на южном (причерноморском) и северном (кубанском) макросклонах Западного Кавказа. *A. negundo* на южном макросклоне доходит до 200 м н.у.м., а на северном до 600-800 м н.у.м. Авторы отмечают его произрастание в нарушенных низкогорных лесах, на опушках и во вторичных остепенённых лугах, в пойменных и прирусловых лесах предгорного пояса. Такое распространение *A. negundo* обусловлено климатическими условиями, степенью нарушенности территорий, разным прессом антропогенной нагрузки.

В связи с этим важно выявление биологических особенностей видов, которые способствуют потенциальному успеху инвазии [8; 22; 26]. Изучение морфологической структуры растений и изменчивости отдельных признаков дает представление об их адаптивных механизмах в условиях действия факторов среды. При изучении изменчивости растений в качестве объекта исследований часто используют лист, обеспечивающий протекание важных физиологических процессов [1].

Различные экологические факторы окружающей среды могут приводить к варьированию морфологических признаков растений, повышая их изменчивость [11; 19; 23; 25; 29].

В литературе достаточно широко представлены результаты исследований влияния антропогенной нагрузки на морфометрические показатели листьев *A. negundo* [5; 16], рассмотрен биоиндикационный аспект изменчивости листьев в урбаносреде [21; 25].

В Адыгее путем изучения состояния популяций двух адвентивных видов деревьев (*Robinia pseudoacacia* L. и *A. negundo* L.) на разных участ-

ках высотного градиента (70–700 м н.у.м) оценены тенденции изменения верхних пределов их распространения в долине р. Белая (Западный Кавказ). В качестве анализируемых параметров использованы жизненность и возраст деревьев, диаметр стволов и радиальный годовой прирост [2], в то время как оценка внутри- и межпопуляционной изменчивости морфологических признаков листа практически не проводилась, хотя многими авторами [6; 15; 17; 18; 20] подчеркивается важность исследования морфологической изменчивости для выявления характера микроэволюционных процессов, в частности адаптаций связанных с более широким спектром эколого-географических факторов. Эти данные необходимы для расширения представлений о механизмах, лежащих в основе адаптивных стратегий инвазивных видов, в том числе *A. negundo*, что позволит прогнозировать поведение *A. negundo* в пойменных лесах Адыгеи, и дать рекомендации по использованию *A. negundo*, распространение которого угрожает биобезопасности, ведет к сокращению биоразнообразия региона.

Цель работы – выявление изменчивости морфологических показателей листа популяций *Acer negundo* L. в высотном градиенте Северо-Западного Кавказа (Республика Адыгея).

Материал и методы исследования

Исследования проводились в летний период 2022-2023 гг. на территории Республики Адыгея. Материалом исследований послужили четыре популяции *Acer negundo*, произрастающих на участках: Гиагинский район, окрестности ст. Гиагинская (G); г. Майкоп (M); Майкопский район, х. Красный мост (K); Майкопский район, окрестности ст. Даховской (D).

Районы исследования были выбраны по высотному градиенту в пределах от 120 до 600 м н.у.м. согласно имеющимся литературным данным по распространению *A. negundo* на Северо-Западном Кавказе [3] (Рисунок 1, Таблица 1). Анализ метеоусловий осуществлялся по данным www.pogodaklimat.ru.

Исследуемые популяции входят в состав пойменных лесов малых рек Северо-Западного Кавказа (река Белая, река Курджипис, река Дах, река Гиага).

Сбор растительного материала осуществляли в середине вегетационного периода из нижней части кроны древесных растений одного возраста на генеративной стадии развития с четырех сторон экспозиции, используя случайный выбор из полного множества возможных вариантов, что позволяет корректно оперировать с вероятностями событий и вычислять значения статистических критериев, а также распространять полученные

выводы на всю исследуемую популяцию. Повторность отбора листьев и лабораторных анализов трехкратная.



Рис. 1. Схема расположения районов исследования на территории Республики Адыгея.

G – Гиагинский район, окрестности ст. Гиагинская, М – Майкоп, К – Майкопский район, х. Красный мост, D – Майкопский район, окрестности ст. Даховской

Таблица 1.

Природно-климатическая характеристика районов исследования (июль, 2022-2023 гг.)

Районы исследования	Широта	Долгота	Высота н.у.м.	Средне-месячная температура, °С	Среднее кол-во осадков, мм	Средне-месячная влажность, %
Майкоп	44° 35' 26''	40° 06' 22''	212	27	59,5	60
Майкопский район, х. Красный мост	44° 32' 10''	40° 06' 34''	238	24	83	62

Гиагинский район, окрестности ст. Гиагинская	44° 50' 24''	40° 05' 37''	129	27	79,3	57
Майкопский район, окрестности ст. Даховской	44° 14' 14''	40° 12' 21''	570	23,5	94,4	62

Материал фиксировали методом гербаризации. Листья сканировали с адаксиальной стороны с помощью многофункционального устройства Samsung SCX-3400 при разрешении 1275×1755 пикселей. Вычисление площади листьев проводили по алгоритмам на языке Python 3.1. Толщину листьев измеряли прибором Тургоромер-1 с измерительной головкой системы ТН10-60Т и ценой деления 0,01 мм, показания даны в мм. Измерение морфологических признаков листа проводили штангенциркулем с точностью $\pm 0,01$ мм. Измеряли следующие параметры: L_1 – максимальная длина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_2 – максимальная ширина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_3 – площадь листовой пластинки верхнего листочка, см^2 ; L_4 – толщина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_5 – угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка; L_6 – индекс листовой пластинки (ИЛП) – отношения длины и ширины верхней непарной лопасти сложного листа *A. negundo*; L_7 – флуктуирующая асимметрия (ФА) [4].

Флуктуирующую асимметрию листьев определяли по общепринятой методике [9; 13]. Измерения осуществляли на верхней непарной листовой пластинке с помощью штангенциркуля и транспортира с точностью 1° . В качестве флуктуирующих признаков билатеральной структуры листа рассматривали парные признаки: ширина половинки листовой пластинки, измеренная на середине ее длины; ширина половинки листовой пластинки, измеренная от основания третьей жилки второго порядка; длина второй жилки второго порядка; расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка; расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; расстояние от основания третьей жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; угол между центральной жилкой и второй жилкой второго порядка.

Статистический анализ изменчивости морфологических признаков выполнен методами описательной статистики, анализа главных компонент, корреляционного, дисперсионного, кластерного анализов, и линейной регрессии. Дисперсионный анализ, линейная регрессия выполнены

с использованием языка программирования Python 3.11.1 и библиотеки statsmodels 0.14.0; метод главных компонент, кластерный анализ – с помощью библиотеки scikit-learn 1.3.1 для языка программирования Python 3.11.1; корреляции посчитаны при помощи библиотеки numpy 1.24.2 для языка программирования Python 3.11.1.

Уровни варьирования приняты по Зайцеву: $CV < 10\%$ – низкий, $CV = 10\text{--}20\%$ – средний, $CV > 20\%$ – высокий [12]. Сила корреляции оценена в величинах: 0,7 (сильная), 0,3–0,7 (средняя), меньшая 0,3 (слабая) [10].

Статистически значимой принята значимость различия между средними значениями при $p \leq 0,05$. Результаты исследования выражены в виде средней арифметической величины со стандартным отклонением.

Результаты исследования

Результаты исследований морфологических признаков листа *A. negundo* по объединенной выборке для показателей максимальная длина и толщина листовой пластинки верхнего листочка показали средний уровень изменчивости ($CV=11,5$ и $15,7\%$, соответственно) (Таблица 2).

Все остальные морфологические признаки листа, такие как максимальная ширина, площадь листовой пластинки, угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка, индекс листовой пластинки, флуктуирующая асимметрия в объединенной выборке показали высокий уровень варьирования ($21,7\text{--}46,7\%$). Максимальная длина листовой пластики верхнего листочка (L_1) у популяции М наблюдалась на низком уровне варьирования признака ($8,1\%$), а у остальных популяций – на среднем уровне ($11,5\text{--}13,5\%$). Такая же тенденция прослеживалась по варьированию признака L_4 . Варьирование признаков L_2, L_3, L_5, L_6 у всех популяций на высоком уровне ($18,1\text{--}42,1\%$), но у Даховской популяции *A. negundo* внутривидовая изменчивость признака L_5 регистрировалась на среднем уровне ($15,4\%$).

Таблица 2.

Средние показатели морфологических признаков листа *A. negundo* по популяциям

Признаки	Популяции									
	G, 129 м		M, 212 м		K, 238 м		D, 570 м		Объединенная выборка	
	$\bar{x} \pm s_x$	CV, %	$\bar{x} \pm s_x$	CV, %	$\bar{x} \pm s_x$	CV, %	$\bar{x} \pm s_x$	CV, %	$\bar{x} \pm s_x$	CV, %
L_1	11,1±0,30	12,1	11,3±0,20	8,1	11,4±0,29	11,5	10,7±0,32	13,5	11,1±0,14	11,5
L_2	7,7±0,35	20,7	8,2±0,64	34,5	9,2±0,66	32,2	7,3±0,35	21,5	8,1±0,27	29,7
L_3	43,5±2,02	20,8	43,5±2,74	28,1	56,7±4,6	36,3	63,2±5,29	37,4	51,7±2,14	37,0

L_4	0,1±0,003	12,1	0,1±0,005	18,3	0,1±0,004	14,7	0,1±0,003	11,8	0,1±0,002	15,7
L_5	55,1±2,88	23,3	43,3±2,21	22,8	53±2,15	18,1	52,3±1,79	15,4	50,9±1,23	21,7
L_6	1,5±0,008	24,7	1,5±0,11	32,3	1,4±0,13	42,1	1,5±0,10	29,5	1,5±0,05	31,9
L_7	0,088±0,008	40,2	0,085±0,008	43,7	0,076±0,008	48,6	0,061±0,007	49,7	0,078±0,004	46,7

Примечание: L_1 – максимальная длина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_2 – максимальная ширина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_3 – площадь листовой пластинки верхнего листочка, см²; L_4 – толщина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_5 – угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка; L_6 – индекс листовой пластинки; L_7 – флуктуирующая асимметрия.

Средние значения показателя L_7 уменьшались по мере увеличения высоты над уровнем моря: от 0,088±0,008 на высоте 129 м н.у.м. до 0,061±0,007 на высоте 570 м н.у.м., а признак L_3 увеличивался с набором высоты от 212 м н.у.м. (от 43,5±2,02 до 63,2±5,29).

Анализ изменчивости изучаемых морфологических параметров листа проводился при помощи дисперсионного анализа (при уровне значимости $p \leq 0,05$). Дисперсионный анализ включал проверку гипотезы о том, что различия между популяциями по изучаемым параметрам листа отсутствуют. Соответственно, если p -значение меньше уровня значимости, данная гипотеза отвергалась (Таблица 3).

Таблица 3.

Результаты дисперсионного анализа морфологических параметров листа популяций *A. negundo*

Параметры листа	p -значения
максимальная длина листовой пластинки верхнего листочка	0,306721
максимальная ширина листовой пластинки верхнего листочка	0,063514
площадь листовой пластинки верхнего листочка	0,000619
толщина листовой пластинки верхнего листочка	0,000478
угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка	0,002409
индекс листовой пластинки	0,792109
флуктуирующая асимметрия	0,081077

Примечание: жирным шрифтом в таблице выделены параметры, имеющие p -значения $< 0,05$.

Наиболее существенные различия между популяциями наблюдались в параметрах L_3 , L_4 , L_5 .

Для определения морфологических признаков, которые вносят наибольший вклад в изменчивость листа *A. negundo*, был применен метод

главных компонент. В таблице 4 приведены результаты, отражающие вклад межгрупповых компонент дисперсии в общую вариабельность признаков.

Таблица 4.

Характеристики главных компонент

Компоненты	Значение	Дисперсия (%)	Кумулятивная дисперсия (%)
1	12,825620	29,374379	29,374379
2	10,480822	19,615648	48,990027
3	9,346298	15,598800	64,588827
4	8,709548	13,545756	78,134583
5	8,197941	12,001113	90,135696
6	7,261898	9,416992	99,552688
7	1,582702	0,447312	100,000000

Таблица 5.

Корреляция главных компонент с морфологическими параметрами листьев *A. negundo*

Морфологические параметры	Главные компоненты						
	1	2	3	4	5	6	7
L_1	0,46	-0,13	-0,56	0,61	-0,092	0,28	-0,051
L_2	-0,89*	0,097	-0,28	0,24	0,02	0,23	0,11
L_3	-0,25	-0,72*	-0,21	0,2	-0,11	-0,57	0,011
L_4	-0,15	-0,61*	0,42	-0,048	-0,55	0,36	-0,0045
L_5	-0,018	0,038	0,69	0,66	0,28	-0,057	0,0041
L_6	0,98*	-0,12	0,032	-0,014	-0,53	-0,018	0,13
L_7	-0,013	0,67*	0,052	0,21	-0,66	-0,26	0,04

Примечание: L_1 – максимальная длина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_2 – максимальная ширина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_3 – площадь листовой пластинки верхнего листочка, см²; L_4 – толщина листовой пластинки верхнего листочка, мм; L_5 – угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка; L_6 – индекс листовой пластинки (ИЛП) – отношения длины и ширины верхней непарной лопасти сложного листа *A. negundo*; L_7 – флуктуирующая асимметрия (ФА)

Статистический анализ подтвердил семь значимых главных компонент со значениями выше 1. Распределение дисперсии различно в каждой из главных компонент, причем первая объясняет большую часть морфологической изменчивости (29,4%). Вторая компонента определяет наибольшую долю оставшейся общей дисперсии (19,6%).

Для первой компоненты сильная корреляция ($>0,7$) была отмечена для двух параметров – L_2 и L_6 (Таблица 5). Для второй компоненты – только для одного признака L_3 . Для третьей, четвертой, пятой и шестой компоненты сильные корреляции не выявлены, а для седьмой компоненты сила корреляции слабая по всем параметрам листа.

При использовании метода главных компонент каждая компонента строилась так, чтобы при проекции на нее разброс был наибольшим, поэтому в первых двух компонентах содержится наибольшее количество информации.

Структура морфологической изменчивости в изученных популяциях по двум главным компонентам представлена на рисунке 2.

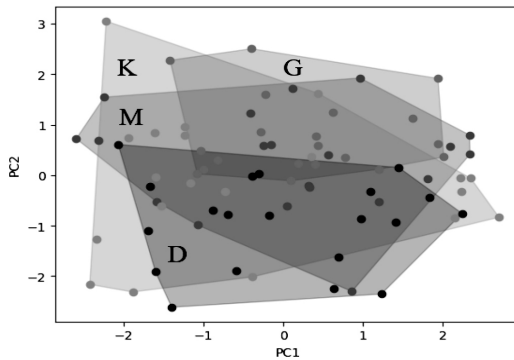


Рис. 2. Морфологическая изменчивость популяций *A. negundo* по первой и второй главной компоненте.

G – Гиагинский район, окрестности ст. Гиагинская, M – Майкоп, K – Майкопский район, х. Красный мост, D – Майкопский район, окрестности ст. Даховской

Для изучения влияния природно-климатических факторов на морфологические параметры листьев была проведена линейная регрессия и подсчитаны r -значения ее коэффициентов (Таблица 6).

Таблица 6.

R -значения, полученные в результате линейной регрессии

Факторы	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Высота	0,11350	0,02447	0,62252	0,01594	0,08920	0,37181	0,28911
Температура	0,34268	0,11290	0,16239	0,69109	0,37678	0,12327	0,22163
Осадки	0,73129	0,71822	0,25999	0,19344	0,00003	0,81820	0,90930
Влажность	0,00195	0,00170	0,06188	0,00450	0,97685	0,94427	0,90908

Примечание: жирным шрифтом выделены r -значения $<0,05$.

Высота над уровнем моря оказывала влияние на L_2 и L_4 , влажность - на L_1 , L_2 , L_4 , количество осадков - на L_5 . На рисунке 3 приведена регрессионная линия, которая визуальнo отражает влияние количество осадков на L_5 .

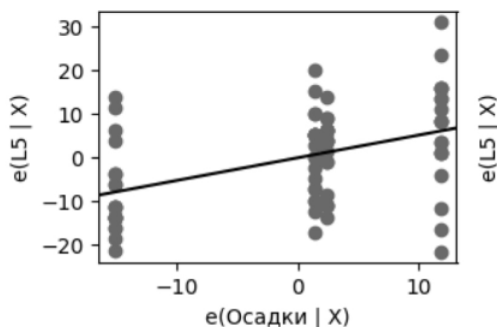


Рис. 3. Регрессионная модель, описывающая влияние количества осадков на угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка (L_5) *A. negundo*

Обсуждение

Изучение изменчивости морфологических признаков листьев обеспечивает понимание того, как растения реагируют на изменения спектра эколого-климатических условий, дает представление о приспособленности видов, динамике сообществ и функционировании экосистем [30; 31; 32].

Согласно полученным данным (Таблица 2), морфологические признаки листа *A. negundo* характеризовались средним и высоким уровнем изменчивости. Вероятно, это связано с влиянием комплекса природно-климатических условий, обусловленных высотным градиентом на рост и развитие растений. Внутрипопуляционная изменчивость варьировала на низком и среднем уровне у таких показателей, как максимальная длина и толщина листовых пластинки верхнего листочка у всех изученных популяций, что указывает на стабильность данных признаков. Более чувствительными к действию набора экологических факторов являлись признаки с высоким уровнем изменчивости: максимальная ширина, площадь листовых пластинки, угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка, индекс листовых пластинки.

Вклад высотного градиента в изменчивость признака «площадь листовых пластинки верхнего листочка» неоднозначен. Средние значения данного признака увеличивались с высотой н.у.м., что, возможно, было бы объяснить повышением количества осадков, но проведенный анализ изменчивости изучаемого параметра с учетом линейной регрессии не вы-

явил достоверного влияния природно-климатических факторов (высота, температура, осадки, влажность) на данный признак ($p > 0,05$).

На уровень стабильности развития ФА *A. negundo* в период наблюдений природные факторы не оказывали существенного влияния ($p > 0,05$). Вероятно, уменьшение средних значений данного показателя по мере увеличения высоты н.у.м. зависит от степени антропогенного воздействия.

Дисперсионный анализ выявил достоверные различия между популяциями по следующим признакам: толщина листовой пластинки, площадь листовой пластинки верхнего листочка, угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка *A. negundo*. Отсутствие различий между популяциями по максимальной длине, ширине листовой пластинки, ИЛП и ФА говорит о слабо выраженном влиянии высотного градиента на изменчивость данных параметров.

Методом главных компонент определены морфологические признаки, которые вносят наибольший вклад в изменчивость листа у растений *A. negundo* в исследуемых популяциях. В большей степени в изменчивость листа вносили вклад такие мерные признаки как: ширина и площадь листовой пластинки и аллометрический признак – индекс листовой пластинки. Анализ морфологической изменчивости популяций *A. negundo* по первой и второй главной компоненты (Рисунок 2) показал различие между Гиагинской и Даховской популяциями по второй главной компоненте, так как у них наименьшие области перекрытия в отношении переменных в исходном наборе данных.

По первой главной компоненте исследуемые факторы популяции находились близко друг к другу и образовывали однородную группу. Различие популяций Даховской и Гиагинской по второй главной компоненте частично можно объяснить влиянием высоты и влажности на толщину листовой пластинки, где корреляция второй компоненты с данным признаком составила – 0,61.

Для определения сходства между популяциями использована агломеративная кластеризация. Для каждой популяции параметры усреднялись, т.е. каждая популяция представлялась вектором средних. Далее каждая популяция принималась за отдельный кластер, а за расстояние между кластерами – максимальное расстояние между их показателями. Пара кластеров с наименьшим расстоянием объединялась в один. Графическим изображением результатов кластеризации методом ближнего соседа является построение дендрограммы (Рисунок 4).

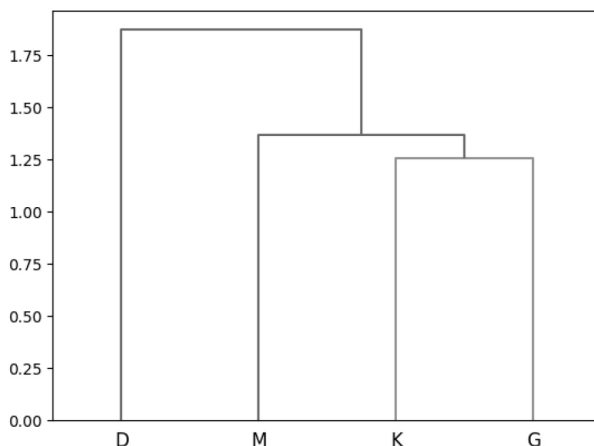


Рис. 4. Дендрограмма сходства популяций *A. negundo* на основе морфологических признаков листьев.

G – Гиагинский район, окрестности ст. Гиагинская, М – Майкоп, К – Майкопский район, х. Красный мост, D – Майкопский район, окрестности ст. Даховской

На первом этапе кластеризации Гиагинская популяция объединилась в кластер с популяцией Красный мост. На последнем этапе в отдельный кластер выделилась Даховская популяция, наиболее отличающаяся по совокупности морфологических показателей листа от остальных популяций. Кластерный анализ подтвердил результаты t-теста и метода главных компонент, где Гиагинская и Даховская популяции имели существенное различие по второй компоненте.

Из всех природно-климатических факторов высотного градиента достоверно влияли на морфологические признаки листа *A. negundo* высота над уровнем моря и количество осадков, что подтвердилось результатами линейной регрессии. Методом главных компонент и кластерным анализом были подтверждены морфологические различия в популяциях (G и D), наиболее сильно отличающихся по высоте над уровнем моря и количеству осадков.

Заключение

Адаптивная стратегия инвазивных видов обусловлена совокупностью морфологических признаков, которые позволяют успешно конкурировать как между собой, так и с аборигенными видами.

Сравнительный анализ изменчивости морфологических показателей листьев четырех популяций *A. negundo* в высотном градиенте Се-

веро-Западного Кавказа (Республика Адыгея) в пределах от 120 до 600 м н.у.м. показал средний уровень внутривнутрипопуляционной изменчивости длины и толщины листовой пластинки верхнего листочка и указывает на стабильность данных признаков. Мерные признаки (максимальная ширина, площадь листовой пластинки, угол между центральной и боковой жилкой верхнего листочка) и аллометрические признаки (индекс листовой пластинки, флуктуирующая асимметрия) показали высокую степень варьирования (21,7-46,7%) и более чувствительны к действию набора экологических факторов. На межпопуляционную изменчивость морфологических признаков листьев *A. negundo* (максимальная длина, ширина листовой пластинки, индекс листовой пластинки и флуктуирующая асимметрия) слабовыраженное влияние оказывал высотный градиент.

Наибольший вклад в изменчивость морфологических параметров листьев популяций *A. negundo* вносят ширина и площадь листовой пластинки, индекс листовой пластинки. На изменчивость морфологических признаков листьев популяций *A. negundo* достоверно влияют высота над уровнем моря и количество осадков. Более высокая изменчивость признаков листьев для популяций *A. negundo* Даховской и Гиагинской в разных экологических условиях, определяемых высотным градиентом, можно рассматривать как проявление адаптивного морфогенеза. Следовательно, *A. negundo* обладает высокой экологической пластичностью, высоким экологическим потенциалом и способен выдержать влияние спектра эколого-климатических условий.

Результаты исследований по морфологической изменчивости листьев могут послужить основой для дальнейшего изучения инвазибельности *A. negundo* на Северо-Западном Кавказе.

Информация о конфликте интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

1. Абдуллаева С.Д. Изменчивость количественных признаков листа *Rubus idaeus* L // Труды Дагестанского отделения Русского ботанического общества. Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников М. А.), 2008. С. 34–37.
2. Акатов В.В., Акатова Т.В., Грабенко Е.А. Изменения верхней границы распространения акации белой и клена ясенелистного в долине реки Белая (Западный Кавказ) // Лесоведение. 2014. № 1. С. 21-33.

3. Акатова Т.В., Акатов В.В. Высотное распространение чужеродных видов растений на Западном Кавказе // Российский журнал биологических инвазий. 2019. Т. 12, № 2. С. 25-29.
4. Баранов С.Г., Бурдакова Н.Е. Оценка стабильности развития. Методические подходы. Владимир: Изд-во ВлГУ. 2015. 72 с.
5. Башмаков Д.И. Морфологические индексы листьев *Betula pendula* roth. как индикаторы загрязнения почв тяжелыми металлами // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 4(32). С. 28-35. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.28.35>
6. Викторов В.П. Внутривидовая изменчивость растений. М.: МПГУ, 2016. 174 с.
7. Виноградова Ю.К. Генотипическая изменчивость *Acer negundo* L. на протяжении Транссибирской магистрали // Российский журнал биологических инвазий. 2023. Т. 16. № 3. С. 19-29. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-19-29>
8. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Костина М.В. Клен ясенелистный (*Acer negundo* L.): морфология, биология и оценка инвазивности. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2022. 2018 с.
9. Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. Структурные и биоиндикационные аспекты флуктуирующей асимметрии билатерально симметричных организмов // Журнал общей биологии. 2004. Т. 65(5). С. 433–444.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. Жуйкова Т.В., Мелинг Э.В., Попова А.С. Групповая изменчивость морфологических признаков листа *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) в градиентах погодных условий и техногенной трансформации почв // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 37-57. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>
12. Зайцев Г.М. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.
13. Захаров В.М., Зюганов В.В. К оценке асимметрии билатеральных признаков как популяционной характеристики // Экология. 1980. N1. С. 10–16.
14. Зернов А.С. Материалы к флоре российского Западного Кавказа. Сообщение 3. // Бюл. Моип, отд. Биол. 2003. Т. 108, вып. 3. С. 92–93.
15. Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: основы модульной теории. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 2007. 280 с.
16. Кулахметов Р.М., Башмаков Д.И. Флуктуирующая асимметрия листьев кле-на американского в условиях г. Рузаевки // Промышленная ботаника. 2019. Т. 19. № 3. С. 59-63.

17. Майр Э. Популяция, виды и эволюция. М.: Мир, 1974. 460 с.
18. Мамаев С.А., Горчаковский С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
19. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* Roth) / В.М. Захаров, Е.Г. Шадрина, Н.В. Турмухаметова [и др.] // Известия РАН. Серия биологическая, 2020. №2. С. 191–196. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>
20. Ростова Н.С. Корреляции: структура и изменчивость. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. 308 с.
21. Савинов А.Б., Никитин Ю.Д., Ерофеева Е.А. Биоиндикационный аспект изменчивости листьев *Acer negundo* L. при загрязнении городских почв тяжелыми металлами // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 45-47. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15045>
22. Соколова В. В. Инвазионный потенциал растений экспозиции флоры Кавказа в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина РАН // Российский журнал биологических инвазий. 2022. Т. 15. № 4. С. 55-68. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-4-55-68>
23. Тихонова Н.А., Тихонова И.В., Ямских И.В. Морфологическая изменчивость популяций *Rhododendron dauricum* L. в горах Южной Сибири // Turczaninowia. 2012. Т. 15. № 1. С. 40-44.
24. Уровень видовой полноты и потенциал инвазibility растительных сообществ Западного Кавказа: введение в проблему / В.В. Акатов, Т.В. Акатова, Ю.С. Загурная [и др.] // Проблемы устойчивости экономических и экологических систем: Региональный аспект. Майкоп: ООО «Качество», 2007. С. 84-100.
25. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Флуктуирующая асимметрия листа *Acer negundo* L. как индикатор состояния организма и качества городской среды // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. 28(2). 293-302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>
26. Biology of the invasive species *Acer negundo* L. in the conditions of the northwest caucasus foothills / Е.М. Ednich, I.V. Chernyavskaya, T.N. Tolstikova, S.I. Chitao // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8. No. 30. P. 85426. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i30/85426>
27. Chernyavskaya I., Ednich E., Belous O. Indicators of adaptability of representatives of the genus *Acer* in an urban environment // BIO Web of Conferences 67, 01007 (2023) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236701007>

28. Ex Situ Plant Conservation and Beyond / Havens K., Vitt P., Maunder M., Guerrant E.O., Dixon K. // *BioScience*. 2006. Vol. 56. Is. 6. P. 525–531. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56)
29. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications / J.H. Graham, S. Raz, H. Hel-Or, E. Nevo // *Symmetry*. 2010. Vol. 2. P. 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466>
30. Kvesić S, Hodžić MM, Čater M, Ballian D. Morphologic variability of the *Acer campestre* L. populations in Bosnia and Herzegovina // *Acta Biologica Sibirica*, 2021, Is. 7. P. 327-343. <https://doi.org/10.3897/abs.7.e73001>
31. Li Y.-Q., Wang Z.-H Leaf morphological traits: ecological function, geographic distribution and drivers // *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, vol.45, Iss. 10. pp. 1154–1172. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0405>
32. Solomentseva A.S. Adaptive potential and phenotypic variability of *Ribes* species in the Lower Volga Region // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2022. Vol. 14. No. 6. P. 338-355. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-6-338-355>

References

1. Abdullaeva S.D. *Trudy Dagestanskogo otdeleniya Russkogo botanicheskogo obshchestva* [Proceedings of the Dagestan Branch of the Russian Botanical Society]. Makhachkala: ALEF (IP Ovchinnikov M. A.), 2008, pp. 34–37.
2. Akatov V.V., Akatova T.V., Grabenko E.A. *Lesovedenie* [Forestry], 2014, no. 1, pp. 21-33.
3. Akatova T.V., Akatov V.V. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2019, vol. 12, no. 2, pp. 25-29.
4. Baranov S.G., Burdakova N.E. *Otsenka stabil'nosti razvitiya. Metodicheskie podkhody* [Assessing development stability. Methodological approaches]. Vladimir: Izd-v VISU, 2015, 72 p.
5. Bashmakov D.I. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology], 2022, no. 4(32), pp. 28-35.
6. Viktorov V.P. *Vnutrividovaya izmenchivost' rasteniy* [Intraspecific variability in plants]. Moscow: MPGU, 2016, 174 p.
7. Vinogradova Yu.K. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2023, vol. 16, no. 4, pp. 19-29. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-19-29>
8. Vinogradova Yu.K., Mayorov S.R., Kostina M.V. *Klen yasenelistnyy (Acer negundo L.): morfologiya, biologiya i otsenka invazivnosti* [Ash maple (*Acer negundo* L.): morphology, biology and invasiveness assessment]. Moscow: KMK Publ., 2022, 2018 p.

9. Gelashvili D.B., Chuprunov E.V., Iudin D.I. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General Biology], 2004, vol. 65(5), pp. 48-56.
10. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
11. Zhuykova T.V., Meling E.V., Popova A.S. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* [Volga Ecological Journal], 2023, no. 1, pp. 37-57. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>
12. Zaytsev G.M. *Matematicheskaya statistika v eksperimental'noy botanike* [Mathematical statistics in experimental botany]. Moscow: Science, 1984, 424 p.
13. Zakharov V.M., Zyuganov V.V. *Ekologiya* [Ecology], 1980, no. 1, pp. 10-16.
14. Zernov A.S. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskoy* [Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biological Series], 2003, vol. 108, no. 3, pp. 92-93.
15. Korona V.V., Vasil'ev A.G. *Stroenie i izmenchivost' list'ev rasteniy: osnovy modul'noy teorii* [Plant leaf structure and variability: foundations of modular theory]. Ekaterinburg: Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 280 p.
16. Kulakhmetov R.M., Bashmakov D.I. *Promyshlennaya botanika* [Industrial botany], 2019, vol. 19, no. 3, pp. 59-63.
17. Mayr E. *Populyatsiya, vidy i evolyutsiya* [Population, species and evolution]. Moscow: World, 1974, 308 p.
18. Mamaev S. A., Gorchakovskiy S. A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae na Urale)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the *Pinaceae* family in the Urals)]. Moscow: Science, 1972, 284 p.
19. Zakharov V.M., Shadrina E.G., Turmukhmetova N.V., Ivantsova E.N., Shikailova E.A., Soldatova V.Yu., Sharova N.A., Trofimov I.E. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya* [Biology Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR], 2020, no. 2, pp. 191-196. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>
20. Rostova N.S. *Korrelyatsii: struktura i izmenchivost'* [Correlations: structure and variability]. St. Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2002, 308 p.
21. Savinov A.B., Nikitin Yu.D., Erofeeva E.A. *Problemy regional'noy ekologiy* [Problems of regional ecology], 2018, no. 5, pp. 45-47. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15045>
22. Sokolova V.V. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions], 2022, vol. 15, no. 4, pp. 55-68. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-4-55-68>

23. Tikhonova N.A., Tikhonova I.V., Yamskikh I.V. *Turczaninowia* [Turczaninowia], 2012, vol. 15, no. 1, pp. 40-44.
24. Akatov V.V., Akatova T.V., Zagurnaya Yu.S., Mukhin I.N., Tuniev B.S., Chefranov S.G. *Problemy ustoychivosti ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem: Regional'nyy aspekt* [Problems of sustainability of economic and ecological systems: Regional aspect]. Maykop: LLC "Quality", 2007, pp. 84-100.
25. Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Arctic and Subarctic Natural Resources], 2023, 28(2), pp. 293-302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>
26. Ednich E.M., Chernyavskaya I.V., Tolstikova T.N., Chitao S.I. Biology of the invasive species *Acer negundo* L. in the conditions of the north-west caucasus foothills. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, vol. 8, no. 30, pp. 85426. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i30/85426>
27. Chernyavskaya I., Ednich E., Belous O. Indicators of adaptability of representatives of the genus *Acer* in an urban environment. *BIO Web of Conferences* 67, 01007 (2023). <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236701007>
28. Havens K., Vitt P., Maunder M., Guerrant E.O., Dixon K. Ex Situ Plant Conservation and Beyond. *BioScience*, 2006, vol. 56, no. 6, pp. 525–531. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56)
29. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. *Symmetry*, 2010, vol. 2, pp. 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466/>
30. Kvesić S, Hodžić MM, Čater M, Ballian D. Morphologic variability of the *Acer campestre* L. populations in Bosnia and Herzegovina. *Acta Biologica Sibirica*, 2021, no. 7, pp. 327-343. <https://doi.org/10.3897/abs.7.e73001>
31. Li Y.-Q., Wang Z.-H Leaf morphological traits: ecological function, geographic distribution and drivers. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, vol. 45, no. 10, pp. 1154–1172. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0405>
32. Solomentseva A.S. Adaptive potential and phenotypic variability of *Ribes* species in the Lower Volga Region. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 338-355. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-6-338-355>

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Еднич Евгения Михайловна, ст. преподаватель кафедры физиологии
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»

*ул. Первомайская, 208, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация
ednich@mail.ru*

Чернявская Ирина Владимировна, заведующий кафедрой ботаники, канд. биол. наук, доцент
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»
ул. Первомайская, 208, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация
chernyav.iv@mail.ru*

Толстикова Татьяна Николаевна, директор ботанического сада
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»
ул. Первомайская, 208, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация
mekedaherb@inbox.ru*

Хагур Мариет Нурдиновна, доцент кафедры ботаники, канд. с.-х. наук
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»
ул. Первомайская, 208, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация
hagur.mariet@yandex.ru*

Алиев Марат Вячеславович, заведующий кафедрой прикладной математики, информационных технологий и информационной безопасности, канд. физ.-мат. наук, доцент
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»
ул. Первомайская, 208, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация
alievmarat@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgenia M. Ednich, Senior Instructor, Department of Physiology
*Adyghe State University
208, Pervomaiskaya, Str., Maikop, 385000, Russian Federation
ednich@mail.ru
SPIN-code: 3774-5641
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9425-309X>
Scopus Author ID: 57189345758*

Irina V. Chernyavskaya, Associate Professor, Head of the Department of Botany, Candidate of Biological Sciences

Adyghe State University

208, Pervomaiskaya, Str., Maikop, 385000, Russian Federation

chernyav.iv@mail.ru

SPIN-code: 7089-7875

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5175-9883>

ResearcherID: HDM-3615-2022

Scopus Author ID: 57189346675

Tatyana N. Tolstikova, Director of the Botanical Garden

Adyghe State University

208, Pervomaiskaya, Str., Maikop, 385000, Russian Federation

mekedaherb@inbox.ru

SPIN-code: 1967-8632

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7086-407X>

Scopus Author ID: 57189341715

Mariet N. Khagur, Associate Professor, Department of Botany, Candidate of Agricultural Sciences

Adyghe State University

208, Pervomaiskaya, Str., Maikop, 385000, Russian Federation

hagur.mariet@yandex.ru

SPIN-code: 5132-5776

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3073-4645>

Marat V. Aliev, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Information Technologies and Information Security, Candidate of Physics and Mathematics Sciences

Adyghe State University

208, Pervomaiskaya, Str., Maikop, 385000, Russian Federation

alievmarat@mail.ru

SPIN-code: 4054-3049

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7676-1127>

ResearcherID: K-8013-2012

Scopus Author ID: 16201718500

Поступила 21.12.2023

После рецензирования 10.01.2024

Принята 26.01.2024

Received 21.12.2023

Revised 10.01.2024

Accepted 26.01.2024