

Field trials. Vestn farmatsii. 2022;(2):65–76. doi: 10.52540/2074-9457.2022.2.65. (In Russ.)

25. Pogotskaia AA, Buzuk GN, Sozinov OV. Morphometry of *Chelidonium majus* L.: relationship between size, leaf shape and content of alkaloids and phenolic compounds. Vestn farmatsii. 2010;(3):26–39. (In Russ.)

Адрес для корреспонденции:

г. Витебск, Республика Беларусь,

тел. +375-29-715-08-38,

e-mail: buzukg@mail.ru,

профессор, доктор фармацевтических наук,

Бузук Г.Н.

Поступила 19.12.2022 г.

УДК 581.4:633.584.3.

DOI: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2022.4.54>

Н. А. Кузьмичева

РАЗМЕРНЫЕ ПРИЗНАКИ И ДЕСКРИПТОРЫ ФОРМЫ ЛИСТЬЕВ БЕЛОРУССКИХ ВИДОВ ИВ В ТАКСОНОМИИ РОДА *SALIX* L.

**Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет,
г. Витебск, Республика Беларусь**

*В статье представлена таксономическая значимость морфологических признаков, полученных в результате компьютерной обработки цифровых изображений листьев ив. Перед сканированием листья фиксировали скотчем на фильтровальной бумаге и высушивали в гербарном прессе. Изучены 10 видов ив, произрастающих в Республике Беларусь: *Salix triandra* L., *S. pentandra* L., *S. fragilis* L., *S. myrsinifolia* L., *S. caprea* L., *S. cinerea* L., *S. aurita* L., *S. dasyclados* Wimm., *S. viminalis* L., *S. purpurea* L. 11 размерных признаков листа и дескрипторов его формы позволяют достоверно различить эти виды с помощью канонического анализа. Таксономическая значимость признаков наибольшая для расчетных признаков, таких как эффективный диаметр и малая ось эллипса, вписанного в лист, несколько меньшая – для ширины и длины листа, а также его периметра и компактности. Для более объективной оценки видовой принадлежности ив предложено использовать формулы, включающие средние значения 5 наиболее ценных морфологических признаков.*

Ключевые слова: ивы, *Salix*, морфологические признаки, листья, цифровые изображения, канонический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Современная систематика растений немислима без применения компьютерных технологий [1, 2]. Они могут оказать неоценимую помощь как на этапе изучения морфологических признаков, так и в процессе обработки и интерпретации полученных результатов. Так, для объективизации процесса измерения размеров листа был предложен метод получения цифрового изображения изучаемого органа растения с последующей обработкой его с помощью различных программ [3]. Например, программа ImageJ позволяет объективно определить не только традиционные параметры, такие как длину и ширину листа, но и его площадь, периметр и дескрипторы формы (округлость, компактность и т. д.),

что может быть полезным для целей систематики.

Что касается обработки полученных результатов, то для свертывания большого количества данных и более наглядного их представления очень удобными оказались методы многомерной статистики: метод главных компонент, факторный анализ, канонический анализ и др. [4]. Они используются в настоящее время не только антропологами, но и зоологами и ботаниками [1]. Информативность основных четырех многомерных методов исследования (канонического анализа, метода многомерного шкалирования расстояний Махаланобиса, Т-факторного анализа групповых значений канонических переменных и метода главных компонент) была оценена Дерябиным В. Е. По его данным, «первые

три алгоритма анализа дают практически идентичную обобщенную картину межгрупповой вариации, в то время как четвертый демонстрирует далеко не полное совпадение с ними (несходство вариации составляет 30–63%)» [5].

Основное различие двух моделей анализа состоит в том, что в анализе главных компонент используется вся изменчивость переменных, тогда как в первых трех – только изменчивость переменной, общая и для других переменных. Анализ главных компонент часто более предпочтителен как метод сокращения данных, в то время как канонический и факторный анализы лучше применять с целью определения структуры данных [6, 7]. Именно поэтому для изучения таксономической структуры рода *Salix* L. нами был выбран канонический анализ.

Ранее с его помощью нами были изучены классические морфологические признаки листа и побега 13 видов ив: длина, толщина и угол отхождения побега, длина и ширина листовой пластинки, угол верхушки и основания листа, длина черешка и междоузлия. В число наиболее таксономически значимых признаков были включены почти все изученные признаки побега, за исключением длины [8]. Представляет интерес определить таксономическую значимость как размерных признаков листа ив, так и дескрипторов их формы, поскольку именно форме листовой пластинки придается большое значение в диагностике видов, а перевести ее из описательной категории в численную достаточно сложно. В литературе можно встретить такие способы, как расчет 5 «линнеевских» индексов формы, 38 индексов на основе 10 измеренных вручную размерных параметров листа [1] и т. п. С помощью специальных же подпрограмм программы ImageJ форму листа можно описать в цифровом виде автоматически, то есть более объективно.

Целью настоящего исследования явилась оценка таксономической значимости морфологических признаков листьев 10 белорусских видов ив, определенных путем компьютерной обработки их цифровых изображений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Побеги ив заготавливали в августе 2018 года в естественных фитоценозах в окрестностях г. Витебска. Идентификацию видов проводили с учетом экологических условий места произрастания по совокупности всех морфологических признаков особей [9, 10]. От каждой особи определенного вида ив отбирали несколько нормально развитых побегов в средней части кроны (количество побегов, взятых для анализа, зависело от количества листьев на них), отделяли от них все листья, которые фиксировали в полевых условиях в порядке их расположения на побеге на клейкой прозрачной ленте (скотч), закрывали фильтровальной бумагой и закладывали в гербарный пресс. Далее поступали как при сушке обычного гербария. Всего изучено 1367 листьев с 212 побегов 10 видов ив: ива трехтычинковая (*Salix triandra* L.), ива пятитычинковая (*S. pentandra* L.), ива ломкая (*S. fragilis* L.), ива чернеющая (*S. myrsinifolia* L.), ива козья (*S. Caprea* L.), ива пепельная (*S. cinerea* L.), ива ушастая (*S. aurita* L.), ива шерстистопобеговая (*S. dasyclados* Wimm.), ива прутьевидная (*S. Viminalis* L.), ива пурпурная (*S. purpurea* L.). Виды ив, встречающиеся редко, представлены в меньшем числе образцов. Для получения достоверных данных и интерпретации полученных результатов многие авторы рекомендуют использовать в 40–60 раз больше наблюдений, чем число изучаемых переменных [7]. В нашем исследовании количество листьев больше количества их морфологических признаков в 120 раз.

Для измерения морфологических параметров листьев полученный гербарий сканировали (сканер EPSON Perfection 1270, RGB, 24 bit, 150 dpi). Полученные изображения обрабатывали с помощью программы ImageJ 1.42 L и подпрограмм http://www.gcscs.net/IJ/Shape_Descriptor1p.java и http://www.optinav.com/download/Measure_Roi_Curve.java [3].

Определяли следующие линейные и нелинейные параметры размера и дескрипторы формы листьев:

1. Площадь листа.
2. Периметр листа.
3. Большая ось эллипса, вписанного в лист.
4. Малая ось эллипса, вписанного в лист.

5. Длина листа по линии центральной жилки.
6. Наибольшая ширина листа.
7. Фактор формы = $(4 \pi \cdot \text{площадь листа}) / (\text{периметр листа})^2$.
8. Компактность = $\sqrt{4 \pi \cdot \text{площадь листа}} / (\text{большая ось})$.
9. Округлость = $(4 \cdot \text{площадь листа}) / (\pi \cdot \text{большая ось})$.
10. Отношение длины листа к его ширине.
11. Эффективный диаметр = $\sqrt{(\text{площадь листа} / \pi) \cdot 2}$ [2, 3].

Рассчитывали среднее арифметическое значение по каждому признаку для каждого вида ив и его стандартное отклонение ($X_{cp} \pm x$), а также нормированное отклонение от среднего значения по группе близких видов $(X_i - X_{cp}) / X_{cp}$. Статистическую обработку данных проводили методом канонического анализа с помощью программы, написанной Руденко В. А. по алгоритмам Дерябина В. Е. [4]. После стандартных операций с внутривидовыми и межвидовыми корреляционными матрицами (аналогично проводимым, например, программой STATISTICA 6.0 для дискриминантного анализа) рассчитывали коэффициенты C_i (для каждого исходного признака) комплексных канонических переменных k_i . Они могут быть интерпретированы обычным образом: чем больше коэффициент, тем больше вклад соответствующего признака в дискриминацию совокупностей [7]. Для того чтобы исключить неоправданное завышение таксономической ценности признаков, имеющих большие абсолютные значения, по ходу канонического анализа рассчитывали также показатель информативной ценности

признака G_{gen} , величина которого пропорциональна отношению межгрупповой и внутригрупповой дисперсий и не зависит ни от размера признака, ни от единиц измерения [4].

Канонические переменные (функции) можно рассматривать как обозначения некоторых «скрытых» переменных, лежащих в основе биологических закономерностей. Программа автоматически определяет некоторые оптимальные комбинации переменных, так что первая каноническая переменная проведет наилучшую дискриминацию между всеми группами, вторая функция будет второй наилучшей и т. д. Эти переменные являются независимыми, то есть их вклады в разделение совокупностей не перекрываются. Максимальное число функций равно количеству изученных видов ив минус один, но практическое значение имеют только первые три–четыре [6].

Далее путем подстановки в формулу $k = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_i x_i$ средних значений каждого признака x_{cp} по виду рассчитываются собственные числа (по каждой из канонических переменных для каждого вида) [4]. По этим собственным числам строили графики в плоскости пар канонических переменных, по которым можно наглядно представить степень сходства листьев ив по морфологическим признакам, определенным программой ImageJ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

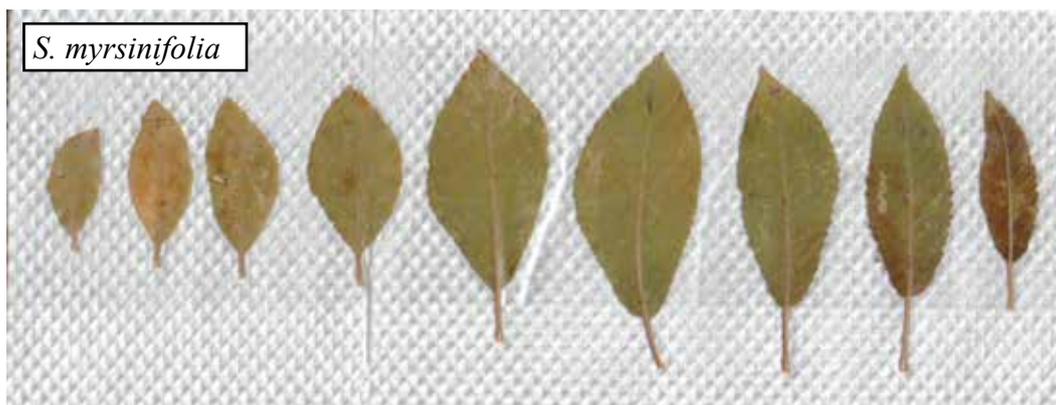
Примеры цифровых изображений листьев ив, полученных после сканирования гербарных образцов, приведены на рисунке 1.



Рисунок 1. – Цифровые изображения листьев ив



Продолжение рисунка 1. – Цифровые изображения листьев ив



Окончание рисунка 1. – Цифровые изображения листьев ив

Средние значения размерных признаков и дескрипторов формы листа 10 видов ив представлены в таблице 1. Отдельные признаки значительно отличаются у разных видов. Например, площадь листа у ивы пурпурной всего 265 мм², в то время как у ивы козьей почти 3000 мм²; периметр листа составляет 94 и 271 мм соответственно. Различаются виды ив и по другим признакам: длине листа (от 42 до 116 мм), ширине листа (от 10 до 46 мм), отношению длины листа к его ширине (от 1,96 до 9,7)

и т. д. Но индивидуальные различия внутри вида также достаточно велики, что не позволяет проводить четкие межвидовые границы по какому-то одному отдельному размерному показателю или дескриптору формы. Для комплексной оценки всех признаков сразу на помощь могут прийти канонические переменные, учитывающие одновременно и размеры, и форму листовых пластинок. В таблице 2 приведены результаты канонического анализа по 11 изученным признакам ив.

Таблица 1. – Морфологическая характеристика листьев изученных видов ив ($\bar{X} \pm \sigma$)

№ признака	Морфологические признаки	<i>S. triandra</i> L., N = 455	<i>S. fragilis</i> L., N = 136	<i>S. pentandra</i> L., N = 34	<i>S. viminalis</i> L., N = 193	<i>S. dasyclados</i> L., N = 17
1	Площадь листа, мм ²	685,8 ± 38,0	1117,1 ± 38,2	2167,6 ± 54,5	715,4 ± 36,9	2075,6 ± 83,7
2	Периметр листа, мм	160,1 ± 5,3	210,9 ± 6,7	259,6 ± 8,7	232,4 ± 4,7	265,3 ± 7,1
3	Большая ось эллипса, вписанного в лист, мм	56,9 ± 1,8	75,5 ± 2,3	86,8 ± 1,7	93,3 ± 2,3	97,7 ± 3,3
4	Малая ось эллипса, вписанного в лист, мм	14,8 ± 0,4	19,0 ± 0,6	31,9 ± 1,1	9,7 ± 0,3	27,0 ± 0,6
5	Длина листа, мм	70,3 ± 2,3	94,5 ± 3,3	108,6 ± 3,3	109,1 ± 2,3	116,8 ± 3,5
6	Ширина листа, мм	15,3 ± 0,5	19,7 ± 0,6	33,0 ± 1,1	9,9 ± 0,3	27,8 ± 0,8
7	Фактор формы	0,33 ± 0,01	0,33 ± 0,02	0,42 ± 0,03	0,16 ± 0,01	0,37 ± 0,01
8	Округлость	0,26 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,37 ± 0,02	0,10 ± 0,01	0,28 ± 0,01
9	Компактность	0,51 ± 0,01	0,51 ± 0,01	0,61 ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,53 ± 0,01
10	Отношение длины листа к его ширине	3,9 ± 0,1	4,1 ± 0,2	2,76 ± 0,14	9,7 ± 0,2	3,6 ± 0,1
11	Эффективный диаметр	28,9 ± 0,8	37,5 ± 0,7	52,5 ± 0,7	30,0 ± 0,8	51,4 ± 1,1
№ признака	Морфологические признаки	<i>S. caprea</i> L., N = 69	<i>S. aurita</i> L., N = 156	<i>S. cinerea</i> L., N = 139	<i>S. purpurea</i> L., N = 48	<i>S. myrsinifolia</i> L., N = 119
1	Площадь листа, мм ²	2938,7 ± 166,0	765,0 ± 27,1	1251,4 ± 61,4	265,8 ± 13,6	1157,9 ± 82,2
2	Периметр листа, мм	271,1 ± 7,2	138,8 ± 3,1	193,7 ± 5,3	93,9 ± 2,6	178,3 ± 6,2
3	Большая ось эллипса, вписанного в лист, мм	84,1 ± 2,0	46,3 ± 1,2	69,0 ± 2,1	37,4 ± 1,0	56,6 ± 2,0
4	Малая ось эллипса, вписанного в лист, мм	44,0 ± 1,6	20,9 ± 0,3	22,8 ± 0,7	9,0 ± 0,2	25,1 ± 0,9
5	Длина листа, мм	110,1 ± 3,0	57,8 ± 1,5	83,9 ± 2,5	41,9 ± 1,1	74,6 ± 2,6
6	Ширина листа, мм	46,0 ± 1,7	22,2 ± 0,3	24,4 ± 0,8	9,7 ± 0,2	26,3 ± 1,0
7	Фактор формы	0,50 ± 0,01	0,50 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,44 ± 0,01
8	Округлость	0,53 ± 0,02	0,46 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,44 ± 0,01
9	Компактность	0,72 ± 0,01	0,68 ± 0,01	0,58 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,66 ± 0,01
10	Отношение длины листа к его ширине	1,96 ± 0,07	2,22 ± 0,05	3,1 ± 0,1	4,1 ± 0,05	2,27 ± 0,04
11	Эффективный диаметр	60,6 ± 1,6	31,2 ± 0,5	39,5 ± 1,0	18,3 ± 0,5	37,6 ± 1,3

Таблица 2. – Результаты канонического анализа морфологических признаков листа ив

№ признака	Морфологические признаки	№ коэффициента	Коэффициенты C_i при канонических переменных				G_{gen}
			k_1	k_2	k_3	k_4	
1	Площадь листа, мм ²	C_1	-0,003	-0,006	-0,001	0,002	14,88
2	Периметр листа, мм	C_2	-0,021	-0,058	-0,131	-0,089	32,96
3	Большая ось эллипса, вписанного в лист, мм	C_3	0,088	-0,224	-0,077	-0,296	30,31
4	Малая ось эллипса, вписанного в лист, мм	C_4	0,410	-0,821	-2,728	-2,679	59,66
5	Длина листа, мм	C_5	-0,005	0,068	0,177	-0,051	28,68
6	Ширина листа, мм	C_6	-0,230	0,051	1,119	-0,779	35,44
7	Фактор формы	C_7	4,626	-21,116	-22,097	-9,407	12,51
8	Компактность	C_8	108,17	40,700	91,403	66,873	30,54
9	Округлость	C_9	-58,905	25,222	18,293	19,609	21,15
10	Отношение длины листа к его ширине	C_{10}	5,31	3,113	2,544	2,217	20,29
11	Эффективный диаметр	C_{11}	-0,147	1,200	1,257	3,234	65,27
	Доля изменчивости, %		46,7	13,2	6,2	3,9	

Информативность каждого исходного признака может быть измерена по значению показателя таксономической ценности G_{gen} . Он изменяется от 12,51 до 65,27 и позволяет выделить наиболее значимые признаки. Такими признаками оказались эффективный диаметр, который характеризует общие размеры листовой пластинки, а также длина малой оси эллипса, вписанного в лист, ширина листа, периметр листа, его компактность и длина большой оси эллипса, вписанного в лист. В таблице 3 приведены коэффициенты, величина и знак которых говорит об участии данного признака в каждой из новых канонических переменных. Они же позволяют рассчитать для каждого вида ив собственные числа (таблица 3) для построения графика

расположения видов ив в координатах канонических переменных (рисунки 2 и 3).

Первая каноническая переменная описывает 46,7% всей изменчивости. Ее морфологический смысл заключается в отделении видов с узкими длинными листьями от видов с листьями относительно округлой формы. По второй канонической переменной виды разделяются в основном по величине листьев, причем учитывается значение эффективного диаметра. Третья каноническая переменная позволяет выделить сравнительно небольшие компактные листья по сравнению с более крупными или вытянутыми в длину. Морфологический смысл четвертой канонической переменной, к сожалению, не вполне ясен.

Таблица 3. – Собственные числа изученных видов ив (k) по каноническим переменным

№	Виды ив	Собственные числа k для видов ив по каноническим переменным			
		k_1	k_2	k_3	k_4
1	<i>S. aurita</i> L.	59,79	41,72	59,42	54,33
2	<i>S. caprea</i> L.	58,70	48,15	51,75	52,21
3	<i>S. cinerea</i> L.	60,20	40,92	55,22	56,46
4	<i>S. dasyclados</i> Wimm.	60,77	42,14	52,73	63,32
5	<i>S. fragilis</i> L.	62,05	39,93	53,75	56,59
6	<i>S. myrsinifolia</i> L.	59,21	43,24	57,61	54,17
7	<i>S. pentandra</i> L.	59,40	43,77	52,32	58,99
8	<i>S. purpurea</i> L.	62,55	34,96	52,87	49,84
9	<i>S. triandra</i> L.	61,46	38,19	53,70	53,61
10	<i>S. viminalis</i> L.	80,94	43,63	55,76	54,61

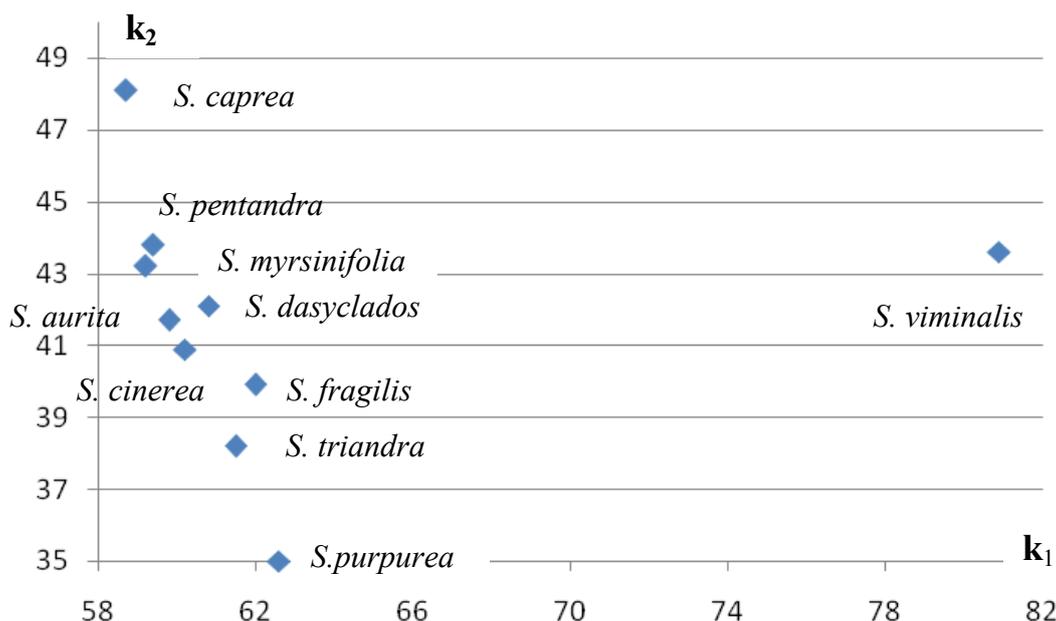


Рисунок 2. – Результаты канонического анализа 11 морфологических признаков 10 видов ив в координатах первой (k_1) и второй (k_2) канонических переменных

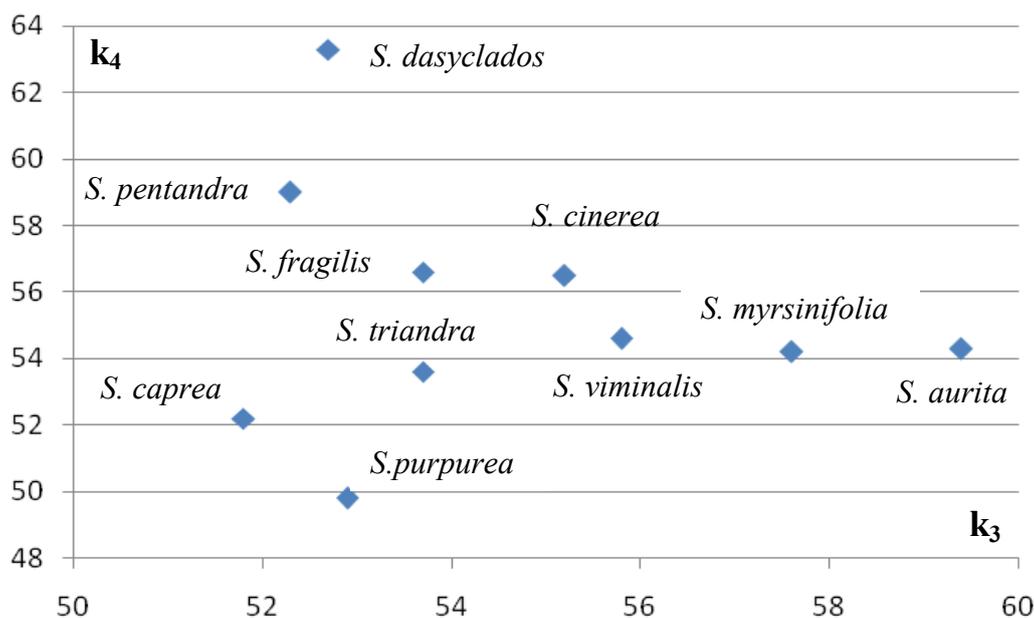
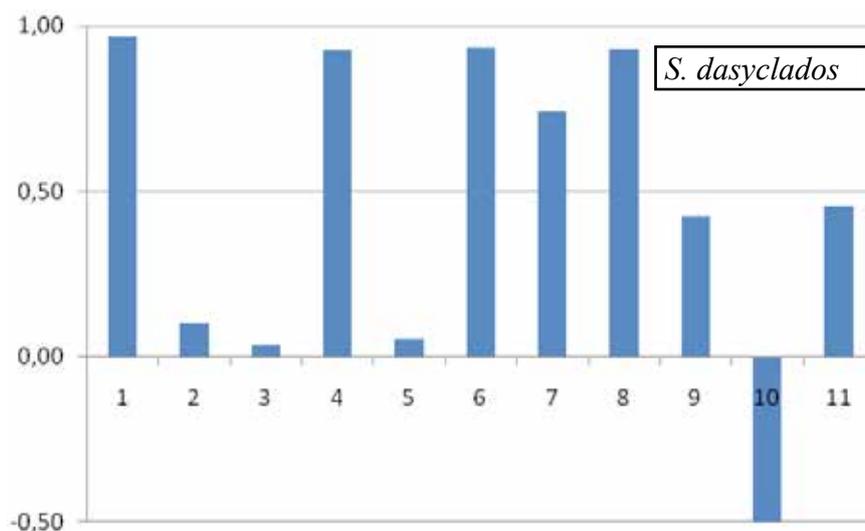


Рисунок 3. – Результаты канонического анализа 11 морфологических признаков 10 видов ив в координатах третьей (k_3) и четвертой (k_4) канонических переменных

Ива прутьевидная резко выделяется по первой канонической переменной. Отношение длины ее листьев к их ширине достигает 10 при среднем значении этого показателя для рода 3,5. По второй канонической переменной легко отделяются ива козья с самыми большими листьями $k_2 \geq 48$ и ива пурпурная с очень мелкими листьями $k_2 \leq 35$. Для надежного разграничения остальных видов следует обратить-

ся к третьей и четвертой каноническим переменным.

Так, ива шерстистопобеговая имеет максимальное значение $k_4 \geq 63$. В природе она не всегда четко дифференцируется от ивы прутьевидной, относящейся к той же секции *Vimen*. Они отличаются по величине листовой пластинки и ее ширине. Эти отличия можно изобразить в виде морфограммы (рисунок 4), на которой каждый



Номера признаков: 1 – площадь листа; 2 – периметр листа; 3 – большая ось эллипса, вписанного в лист; 4 – малая ось эллипса, вписанного в лист; 5 – длина листа; 6 – ширина листа; 7 – фактор формы; 8 – компактность листа; 9 – округлость листа; 10 – отношение длины листа к его ширине; 11 – эффективный диаметр.

Рисунок 4. – Морфограмма признаков ивы шерстистопобеговой по сравнению со средним значением по секции *Vimen* $((X_i - X_{cp}) / X_{cp})$

признак представлен столбиком, высота которого пропорциональна нормированному отклонению от среднего значения по данной секции.

Виды секции *Vetrix* легко различаются по третьей канонической переменной: значения собственных чисел *S. aurita*, *S. cinerea* и *S. caprea* по k_3 равны 59; 55 и 51 соответственно. Морфограмма признаков этих видов приведена на рисунке 5.

Наиболее трудны в диагностике ива трехтычинковая, ива пятитычинковая и ива ломкая. Различить их можно по 2 и 4 каноническим переменным. Для *S. pentandra* $k_2 = 44$; $k_4 = 59$, в то время как для *S. fragilis* эти значения равны 40 и 57, а для *S. triandra* – 38 и 54 соответственно. Ива пятитычинковая имеет более крупные и округлые листья по сравнению с остальными. У ивы ломкой листья чуть больше среднего размера и относительно более узкие. Ива трехтычинковая отличается более мелкими листьями (см. морфограммы на рисунке 6).

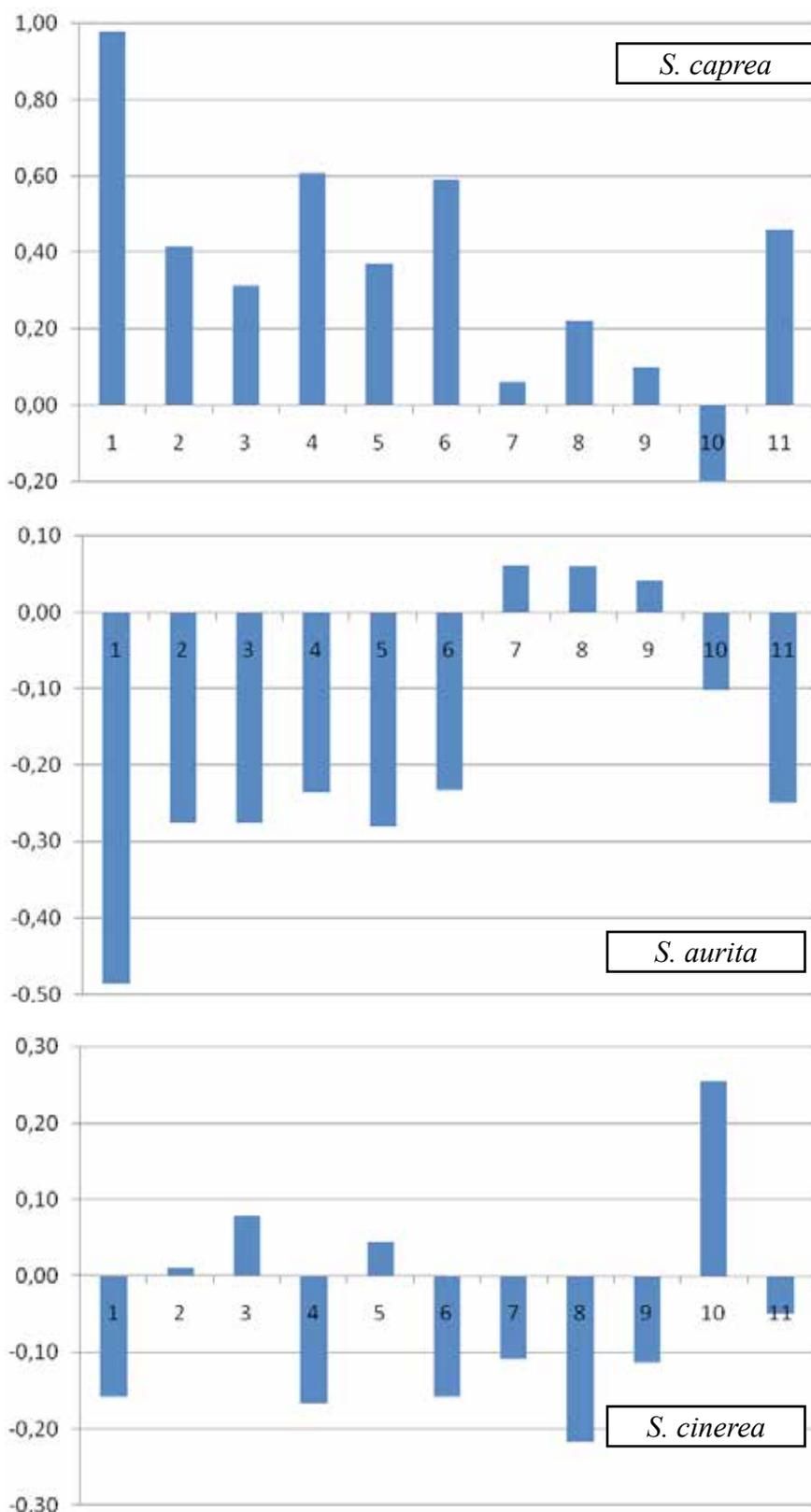
Таким образом, канонический анализ морфологических признаков листьев ив, полученных после компьютерной обработки их цифровых изображений, позволил выделить новые комплексные переменные для более объективного определения видовой принадлежности близких видов ив. Для сокращения анализа он был

повторен с меньшим количеством признаков (от 3 до 8). Наибольшее сходство с вышеприведенным на рисунке 2 было получено при использовании 5 признаков: периметр листа, большая и малая оси эллипса, вписанного в лист, компактность и эффективный диаметр (рисунок 7). В этом списке отсутствует показатель ширины листа, но его заменяет длина малой оси эллипса, вписанного в лист, которая тесно коррелирует с шириной листа, при этом величина G_{gen} для нее существенно выше.

Таким образом, подобное уменьшение количества изучаемых признаков позволяет значительно сократить объем исследований.

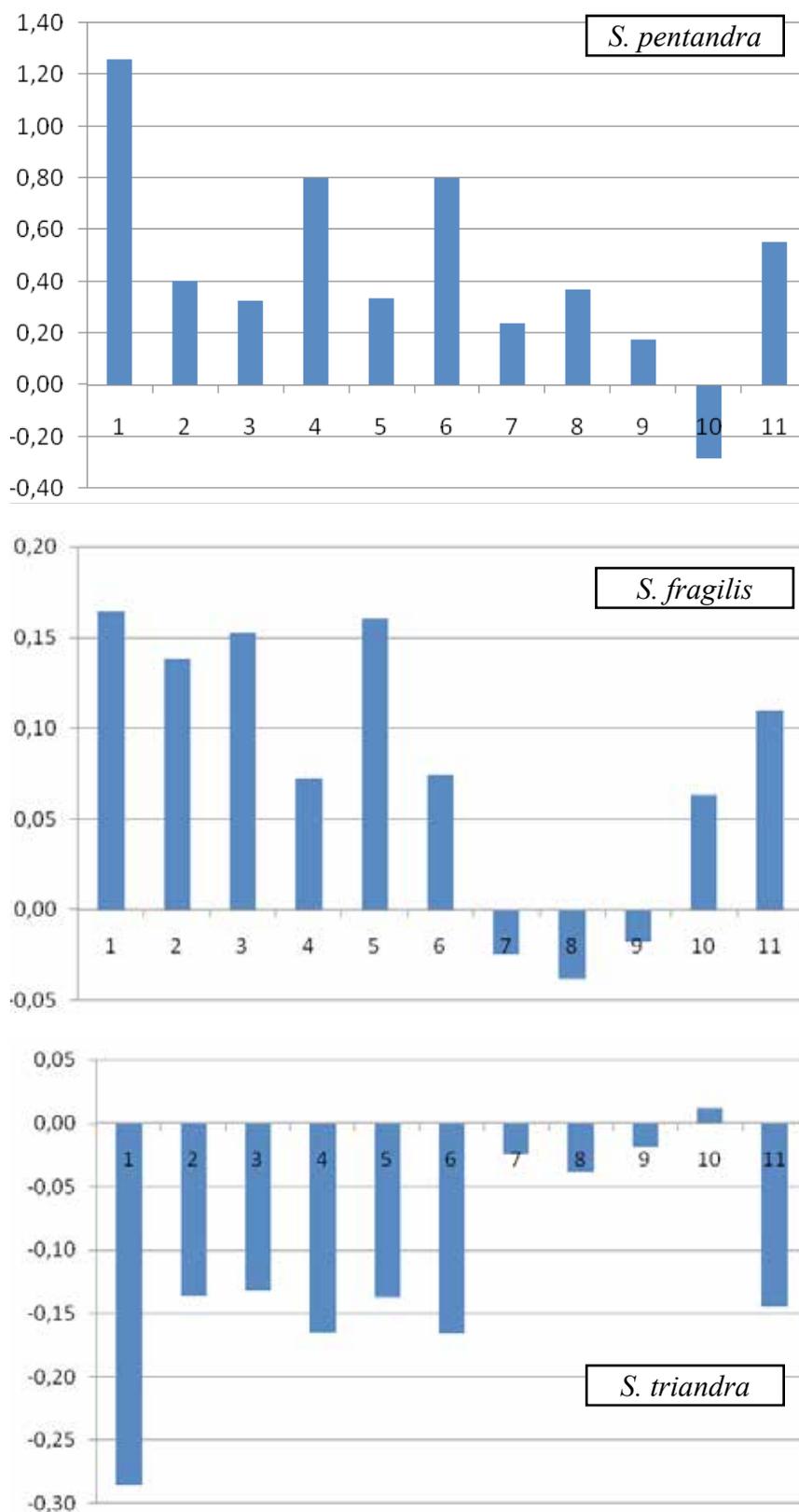
Для каждой пары или тройки близких видов ив необходимы разные канонические переменные, одна или иногда две. Ниже представлены формулы, которые можно использовать на практике (таблица 4).

От экземпляра ивы, таксономическая принадлежность которой к определенному виду вызывает сомнение, следует взять 5 нормально развитых побегов из средней части кроны, затем отделить с каждого из них по 5 нормально развитых листьев, желательнее в средней части побега, зафиксировать их прозрачной клейкой лентой на фильтровальную бумагу и отсканировать.



Номера признаков: 1 – площадь листа; 2 – периметр листа; 3 – большая ось эллипса, вписанного в лист; 4 – малая ось эллипса, вписанного в лист; 5 – длина листа; 6 – ширина листа; 7 – фактор формы; 8 – компактность листа; 9 – округлость листа; 10 – отношение длины листа к его ширине; 11 – эффективный диаметр.

Рисунок 5. – Морфограммы признаков видов секции *Vetrix* по сравнению со средним значением по секции $((X_i - X_{cp}) / X_{cp})$



Номера признаков: 1 – площадь листа; 2 – периметр листа; 3 – большая ось эллипса, вписанного в лист; 4 – малая ось эллипса, вписанного в лист; 5 – длина листа; 6 – ширина листа; 7 – фактор формы; 8 – компактность листа; 9 – округлость листа; 10 – отношение длины листа к его ширине; 11 – эффективный диаметр.

Рисунок 6. – Морфограммы признаков ивы пятитычинковой, ивы ломкой и ивы трехтычинковой по сравнению со средним значением по этим видам $((X_i - X_{cp}) / X_{cp})$

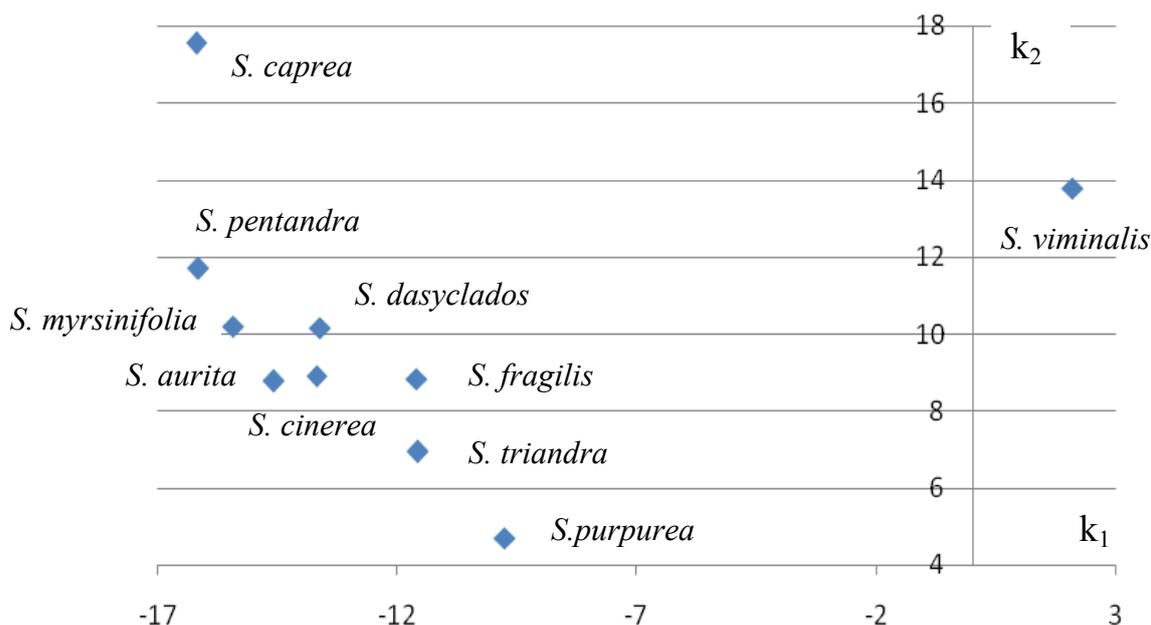


Рисунок 7. – Результаты канонического анализа 5 морфологических признаков 10 видов ив в координатах первой (k₁) и второй (k₂) канонических переменных

Таблица 4. – Формулы расчета собственных чисел ив для определения их видовой принадлежности

<i>S. fragilis</i> L. $k_1 \geq -12$	$k_1 = 0,0537x_2 - 0,6928x_3 - 1,7408x_4 + 18,275x_8 + 2,0346x_{11}$ *
<i>S. pentandra</i> L. $k_1 \leq -16$	
<i>S. triandra</i> L. $k_2 \leq 7$	$k_2 = 0,0297x_2 + 0,4309x_3 + 1,6473x_4 + 3,6769x_8 - 1,6805x_{11}$
<i>S. viminalis</i> L. $k_1 \geq 2$	$k_1 = 0,0537x_2 - 0,6928x_3 - 1,7408x_4 + 18,275x_8 + 2,0346x_{11}$ $k_4 = -0,0764x_2 + 0,2306x_3 - 1,3818x_4 + 49,722x_8 + 0,998x_{11}$
<i>S. dasyclados</i> Wimm. $k_4 \geq 42$	
<i>S. cinerea</i> L. $k_3 \leq 28$	$k_3 = 0,0238x_2 + 0,3406x_3 + 0,157x_4 + 53,484x_8 - 0,8786x_{11}$
<i>S. aurita</i> L. $k_3 \geq 35$	
<i>S. caprea</i> L. $k_2 \geq 6$	$k_2 = 0,0297x_2 + 0,4309x_3 + 1,6473x_4 + 3,6769x_8 - 1,6805x_{11}$
<i>S. purpurea</i> L. $k_2 \leq 5$	$k_2 = 0,0297x_2 + 0,4309x_3 + 1,6473x_4 + 3,6769x_8 - 1,6805x_{11}$
<i>S. myrsinifolia</i> L. $k_3 \geq 29$	$k_3 = 0,0238x_2 + 0,3406x_3 + 0,157x_4 + 53,484x_8 - 0,8786x_{11}$

Примечание: * x_2 – периметр листа; x_3 – большая ось эллипса, вписанного в лист; x_4 – малая ось эллипса, вписанного в лист; x_8 – компактность листа; x_{11} – эффективный диаметр.

Полученное изображение преобразовать с помощью программы ImageJ, получить таблицу из 5 таксономически значимых признаков, найти среднее арифметическое каждого признака и подставить в формулу, соответствующую близким видам. Для каждого вида в таблице 4 приводится критическое значение собственного числа, по которому можно принять окончательное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что 10 видов ив, произрастающих в Беларуси, достоверно различаются по размерным признакам листа и дескрипторам его формы, численное значение которых можно получить с помощью программы ImageJ, автоматически обрабатывающей цифровые изображения листьев. Методом канонического анализа с

помощью программы, написанной В. А. Руденко по алгоритмам В. Е. Дерябина, были выявлены наиболее значимые в таксономическом отношении признаки: периметр листа, большая и малая оси эллипса, вписанного в лист, компактность и эффективный диаметр. Вычислены четыре комплексных признака (канонических переменных), описывающих в сумме 70% изменчивости листьев. Морфологический смысл объяснен для первых трех из них: по первой канонической переменной легко различаются узкие длинные листья и округлые, по второй – в основном крупные и мелкие, по третьей – сравнительно небольшие компактные и листья большего размера или вытянутые в длину. По результатам канонического анализа предложены формулы для более объективной оценки видовой принадлежности белорусских видов ив. С целью сокращения объема работы в них включены средние значения только 5 морфологических признаков из 11, что практически не сказывается на результатах идентификации.

SUMMARY

N. A. Kuzmichova

MORPHOLOGICAL FEATURES AND DESCRIPTORS OF LEAVES SHAPES OF BELORUSSIAN WILLOWS SPECIES IN GENUS *SALIX* L. TAXONOMY

Taxonomical value of morphological features obtained as a result of computer processing of digital images of willow leaves is presented in the article. Willow leaves were fixed with the adhesive tape on filter paper before scanning and were dried in a plant press. 10 willows species growing in the Republic of Belarus were examined: *Salix triandra* L., *S. pentandra* L., *S. fragilis* L., *S. myrsinifolia* L., *S. caprea* L., *S. cinerea* L., *S. aurita* L., *S. dasyclados* Wimm., *S. viminalis* L., *S. purpurea* L. 11 morphological features of the leaf and descriptors of its form make it possible to distinguish these species accurately with the canonical analysis. Taxonomical value of the features is the greatest for the calculated characteristics such as effective diameter and minor axis of an ellipse, inscribed in a leaf, and is a bit less for the width and length of the leaf and also its perimeter and compactness. It is proposed to use formulas including average values of 5 most valuable morphological features for more objective assessment of willow species.

Canonical analysis results led to formulas that enable better identification of willows species by 5 morphological characters.

Keywords: willows, *Salix*, morphological features, leaves, digital images, canonical analysis.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гашева, Н. А. Опыт применения дискриминантного анализа для различения фенотипически сходных видов ив / Н. А. Гашева // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2005. – № 6. – С. 123–130.
2. Бузук, Г. Н. Морфометрия лекарственных растений. 2. *Vaccinium myrtillus* L.: взаимосвязь морфологических признаков и химического состава / Г. Н. Бузук, Н. А. Кузьмичева, А. В. Руденко // Вестн. фармации. – 2007. – № 1. – С. 26–37.
3. Image Processing and Analysis in Java [Electronic resource]. – Mode of access: <https://nmmitools.org/2019/01/01/imagej/>. – Date of access: 21.12.2022.
4. Дерябин, В. Е. Многомерные биометрические методы для антропологов / В. Е. Дерябин. – Москва, 2001. – 312 с. – Деп. в ВИНТИ 10.01.2001, № 37–В2001.
5. Федотова, Т. К. Василий Евгеньевич Дерябин: памяти друга, коллеги, учителя / Т. К. Федотова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 23, Антропология. – 2019. – № 4. – С. 146–149.
6. Главные компоненты и факторный анализ [Электронный ресурс] // Электронный учебник по статистике / StatSoft. – Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan>. – Дата доступа: 21.12.2022.
7. Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс] / StatSoft. – Москва. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.html>. – Дата доступа: 20.12.2022.
8. Кузьмичева, Н. А. Таксономическая значимость морфологических признаков листа и побега восточноевропейских видов ив / Н. А. Кузьмичева // Вестн. фармации. – 2008. – № 4. – С. 12–22.
9. Парфенов, В. И. Ивы (*Salix* L.) в Белоруссии: таксономия, фитоценология, ресурсы / В. И. Парфенов, И. Ф. Мазан. – Минск: Наука и техника, 1986. – 167 с.
10. Валягина-Малютина, Е. Т. Ивы Европейской части России / Е. Т. Валягина-Малютина. – Москва: Товарищество науч. изд. КМК, 2004. – 217 с.

REFERENCES

1. Gasheva NA. Experience in using discriminant analysis to distinguish phenotypically similar

species of willows. Vestn ekologii, lesovedeniia i landshaftovedeniia. 2005;(6):123–30. (In Russ.)

2. Buzuk GN, Kuz'micheva NA, Rudenko AV. Morphometry of medicinal plants. 2. *Vaccinium myrtillus* L.: Relationship between morphological features and chemical composition. Vestn farmatsii. 2007;(1):26–37. (In Russ.)

3. Image Processing and Analysis in Java [Electronic resource]. Mode of access: <https://nmmitools.org/2019/01/01/imagej/>. – Date of access: 21.12.2022

4. Deriabin VE. Multidimensional biometric methods for anthropologists. Moskva, RF; 2001. 312 s. Dep v VINITI 10.01.2001, № 37–V2001. (In Russ.)

5. Fedotova TK. Vasily Evgenievich Deryabin: in memory of a friend, colleague, teacher. Vestn Mosk un-ta. Ser 23, Antropologiya. 2019;(4):146–9. (In Russ.)

6. Principal Components and Factor Analysis [Elektronnyi resurs]. V: StatSoft. Elektronnyi uchebnik po statistike. Rezhim dostupa: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan>. Data dostupa: 21.12.2022. (In Russ.)

7. StatSoft. Elektronnyi uchebnik po statis-

tike [Elektronnyi resurs]. Moskva, RF. Rezhim dostupa: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.html>. Data dostupa: 20.12.2022. (In Russ.)

8. Kuz'micheva NA. Taxonomic Significance of Morphological Features of the Leaf and Shoot of Eastern European Willow Species. Vestn farmatsii. 2008;(4):12–22. (In Russ.)

9. Parfenov VI, Mazan IF. Willows (*Salix* L.) in Belarus: taxonomy, phytocenology, resources. Minsk, RB: Nauka i tekhnika; 1986. 167 s. (In Russ.)

10. Valiagina-Maliutina ET. Willows of the European part of Russia. Moskva, RF: Tovarichestvo nauch izd KMK; 2004. 217 s. (In Russ.)

Адрес для корреспонденции:

210009, Республика Беларусь,
г. Витебск, пр. Фрунзе, 27,
УО «Витебский государственный ордена
Дружбы народов медицинский университет»,
кафедра фармакогнозии с курсом ФПК и ПК,
e-mail: kuzm_n-a@mail.ru,
Кузьмичева Н. А.

Поступила 23.12.2022 г.