

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИСТА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.) НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИУСОВ-ВЕКТОРОВ

А.П. Царев[✉], В.А. Кострикин, Е.В. Недорезова

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии»,
Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

antsa-55@yandex.ru

Рассматривается возможность и целесообразность применения контурного анализа для получения морфометрических показателей листьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). Исследования проведены на пяти лесосеменных плантациях и одном участке испытательных культур плюсовых деревьев в Воронежской и Тамбовской областях; в качестве примера приведены данные по пяти семьям лесосеменной плантации Александровского участкового лесничества (125 листьев с 25 деревьев). Описан метод построения дескрипторов контура листа на основе 64 центромассных радиусов-векторов с применением преобразования Фурье, либо расчета средних длин радиусов-векторов. Показано, что оба подхода дают сходные коэффициенты корреляции (t -тест = 0,203), однако их дескрипторы нельзя комбинировать при сравнении подобия контуров. На базе измеренных радиусов-векторов рассчитаны морфометрические показатели (ширина, периметр, площадь листа и др.) и проверена их достоверность путем сопоставления с контрольными измерениями (курвиметром, по миллиметровой сетке): коэффициенты корреляции составили 0,96 (периметр) и 0,99 (площадь). С помощью дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов оценена изменчивость морфологических признаков и установлены закономерности: наименьшая изменчивость наблюдается внутри растения, более высокая – в семьях, наибольшая – в локальной популяции. Подтверждено достоверное влияние происхождения (семей) на изменчивость ряда морфометрических параметров. Разработаны математические модели для расчета площади и периметра листа по его длине. Составлена справочная схема, позволяющая оперативно определять эти показатели в полевых условиях без изъятия листьев с растений. Результаты могут применяться в лесоводственных исследованиях, селекции и мониторинге изменчивости признаков в популяциях дуба.

Ключевые слова: дуб черешчатый, *Quercus robur* L., генетическое разнообразие, изменчивость, семьи материнского дерева, морфометрические показатели, контурный анализ, преобразование Фурье

Ссылка для цитирования: Царев А.П., Кострикин В.А., Недорезова Е.В. Определение морфометрических показателей листа дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на основе измерений радиусов-векторов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 17–31. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-17-31

Сохранение видов лесных древесных растений является первоочередной задачей в деле сохранения генофонда основных лесобразующих пород. Выявления продуктивных и устойчивых форм дуба черешчатого для дальнейшего размножения являются основой развития и сохранения популяции данного ценного вида. Согласно указу Президента, сохранение биологического разнообразия относится к важнейшим наукоемким технологиям [1]. Обзор литературных источников показывает, что климатические стрессы (засухи) и антропогенные факторы оказывают негативное влияние на состояние дубрав, так, в период с 2000–2018 гг. площадь нарушенных земель в лесостепи Цен-

трально-Черноземного региона выросла с 2,5 до 6 % [2]. Эти изменения могут обусловить нарушение структуры и потерю адаптивной способности популяций [3]. Не последнее место в деградации дубрав занимает слабое возобновление семенного материала в условиях затенения [4]: молодые ростки дуба, находясь под пологом древесных пород, гибнут через 2–3 года. Чувствительность дуба к освещенности, особенно на ранних стадиях развития, указывает на особое значение листьев в процессе фотосинтеза и накопления органических веществ.

Воспроизводство и сохранение древостоев дуба черешчатого невозможно без исследования лесоводственно-экологических и генетических особенностей потомства и материнских деревьев [5]. При этом важное значение имеет сохранение генетического разнообразия [6].

Под термином «генетическое разнообразие», следует понимать биологическое разнообразие в рамках вида, как это трактуется Федеральным законом № 428-ФЗ от 30.11.2024 г. [7]. Основой сохранения генетического разнообразия является отбор и сбережение наиболее продуктивных и устойчивых популяций для дальнейшего воспроизводства.

Фенотипическую ценность признака для отдельного организма определяет комбинация аллелей в локусах в сочетании с влиянием окружающей среды [8]. Адаптация популяции приводит к изменению распределения фенотипических признаков в результате изменения частоты встречаемости аллелей. Поддержание генетического разнообразия увеличивает способность популяции адаптироваться к климатическим изменениям и формировать устойчивые и продуктивные экосистемы. Для многолетних растений, к числу которых относится дуб, увеличение генетического разнообразия связано с переносом пыльцы и семян или внедрением нового генетического материала.

В адаптации видов важное значение имеют листья — вегетативный орган растений, отвечающий за фотосинтез, выделение кислорода, транспирацию, газообмен, запас питательных веществ и др. Лист — орган растения, в котором происходит образование органических веществ, являющихся источником существования самого растения и всех организмов на планете. В дубовых насаждениях, в зависимости от возраста, бонитета и полноты, ежегодно прирастает от 2,5 до 9,9 м³ древесины или 1,2...4,9 т/га [9]. Кроме того, образуется масса листьев в количестве 0,43 т на каждый 1 м³ древесины, а также близкая к этим показателям продукция ветвей [10]. Всего листья дуба ежегодно продуцируют надземной фитомассы от 3 до 13 т органического вещества. С учетом коэффициента соотношения подземной фитомассы к наземной в дубовых лесах [11–13], приведенные показатели увеличиваются до 4...16 т. Такова роль листа в жизни дубовых лесов.

Интерес к форме растений, в частности листа, появился очень давно [14]. Люди обращали на это внимание в целях распознавания растений, что было необходимо как для выбора пищи, так и для других хозяйственных потребностей. Морфологические признаки дуба черешчатого, в том числе листья, изучаются в России более 150 лет [15]. В работе [14] указано на большую изменчивость морфологических признаков листьев видов в роде *Quercus*, начиная от цельнокрайних листьев (например, *Q. Virginiana* Mill, *Q. Laurifolia* Michx, *Q. Phellos* L. и др.), затем слабо-лопастных

(например, *Q. Nigra* L. — 1–3 лопасти) и далее 3–7-лопастных (например, *Q. Ilcifolia* Wang.), 5–11-лопастных (например, *Q. Pagodaefolia* Asche), 7–13-лопастных (например, *Q. borealis*). Отдельные морфологические признаки дуба черешчатого систематически и географически описаны В.П. Малеевым в 1935 г. в обзоре дубов Кавказа и в связи с эволюцией [16]. Отличительным признаком дуба черешчатого является бледно-зеленый цвет нижней стороны листьев и овальные или широко-ланцетные, серопушенные чешуи плюски [16].

Наиболее подробное исследование вегетативных признаков дуба черешчатого представлено в работе [17], где для изучения фенотипической изменчивости рекомендуются листья весеннего прироста с периферии конечных ветвей кроны. Попытка установить коррелятивные связи между признаками листа, однако, не дала положительных результатов.

Методологической основой изучения внутривидовой изменчивости древесных растений послужили разработки, изложенные в работе [18]. Фенотипическая особенность признаков организма описана в работе [19]. Фенотипическая изменчивость — это форма реализации генотипов в процессе естественного отбора существования лесных насаждений. В рамках данного исследования изучается фенотип на основе морфологических показателей.

Морфологические исследования листьев следует проводить на растениях с известной родословной [20, 21]. Совместный анализ морфометрических и генетических показателей листьев позволяет с повышенной точностью идентифицировать таксон видов дуба [22, 23]. Сравнение генетического и фенотипического определения видов [24] в 154 случаях (93,3 %) из 165 взрослых деревьев показало полное совпадение генетического и фенотипического подхода.

Генетические различия между родительской популяцией и потомством внутри вида были низкими и статистически незначимыми. Генетическая идентификация согласуется с морфологией листьев взрослых деревьев [24, 25]. Размеры и форма листьев дуба черешчатого изменяются в зависимости от условий произрастания. Кроме того, обнаружена флуктуирующая асимметрия [26], указывающая на то, что морфологическая изменчивость может быть полезным инструментом для оценки состояния окружающей среды при адаптации лесных экосистем. Для более точных выводов необходимо объединять морфологические, генетические и экологические данные, собранные с разных территорий. Это поможет определить ключевые факторы, влияющие на структуру популяций

дуба черешчатого, и разработать эффективные меры по их сохранению и развитию на местном и глобальном уровнях. Полученные данные должны быть учтены при управлении лесами для обеспечения их устойчивого развития.

Обобщенная морфологическая характеристика дуба черешчатого описана в работе [15] с указанием его наиболее «значимых» морфологических признаков:

- 1) длина листа, мм;
- 2) длина черешка листа, мм;
- 3) форма листа (отношение длины вершинки листа к длине листа);
- 4) рассеченность листа (отношение разности ширины листа по лопалям и по бухтам к ширине листа по лопалям);
- 5) количество лопастей;
- 6) относительная ширина листа (отношение максимальной ширины листа к его длине);
- 7) тангенс угла между центральной и боковой жилками;
- 8) форма лопасти: тупая-острая, широкая-узкая;
- 9) форма основания листа; клиновидная, округлая, сердцевидная, «ушки»;
- 10) наличие промежуточных жилок;
- 11) наличие вторичных лопастей;
- 12) характер опушения листа.

По данным работы [27] среди нормально развитых листьев наиболее отличительными признаками являются толщина, размер и форма листа дуба. Размер листовой пластины дуба черешчатого является по данным автора работы [28] стабильным показателем, при этом изменчивость по длине и ширине листовых пластинок находится на среднем и повышенном уровнях.

Оценка изменчивости дуба черешчатого по морфологическим признакам листьев в четырех популяциях Южного Приуралья изложена в работе [29]. Образцы листьев в каждой из четырех популяций собирались индивидуально с 28–30 деревьев на пробных площадях. Изучены 12 морфологических признаков (включая три относительных). В целом результаты свидетельствуют о гетерогенности дуба черешчатого в Южном Приуралье по морфометрическим признакам и необходимости сохранения генофонда вида на популяционной основе. При исследовании информативности морфометрических параметров географических культур дуба черешчатого в Сотнурском участковом лесничестве Республики Марий Эл на площади 9,9 га отмечено, что слабее всего варьируют размеры желудей и листьев ($V = 6,7 \dots 15,0 \%$) по сравнению с другими показателями [30].

Опыт изучения листьев указывает на постоянный интерес исследователей к данному

вопросу, что подтверждает актуальность и значимость работ в этой области знаний. В преобладающем большинстве морфометрические показатели измеряются линейными, угловыми или площадными величинами.

К прямым методам измерения относится определение параметров листа вручную, в частности следующие методы:

- высечки (весовой метод);
- графический;
- метод палеток;
- линейных промеров.

Из листа делают высечки известной площади, их и всю массу листьев взвешивают и по формуле определяют площадь листа.

Метод высечки (весовой метод) — из листа делают высечки известной площади и взвешивают высечку и всю массу листьев, далее по формуле определяют площадь листа.

По графическому методу или методу палеток, лист обводят, положив на миллиметровую бумагу, или накладывают на него прозрачную пленку с сеткой, считают количество клеток (на бумаге или сетке) и, суммируя подсчитанные данные, определяют площадь листа.

Метод линейных промеров включает в себя измерение длины и ширины листа, далее полученную площадь прямоугольника умножают на коэффициент формы листа.

Косвенные способы включают:

- планиметрический метод (использование механического прибора — планиметра);
- использование сканеров;
- компьютерный анализ изображений с помощью соответствующих программ. Существуют также программные комплексы, в частности LeafArea, ImageJ и другие, позволяющие отображать, редактировать, анализировать, обрабатывать, сохранять и печатать 8-битные, 16-битные и 32-битные изображения [31].

Предлагаются также новые способы измерения площади, периметра, формы листьев у древесных растений [32–36], однако по ограниченному числу параметров.

В работе [37] приводятся результаты определения площади листовой пластины по пяти следующим методам сравнения:

- расчетных коэффициентов;
- весовому;
- на основе программы Matlab;
- с использованием приложения для смартфонов Petiole;
- контрольного, с помощью нанесения контуров на миллиметровую бумагу.

По точности определения все эти методы показали высокую степень корреляции с контрольным.

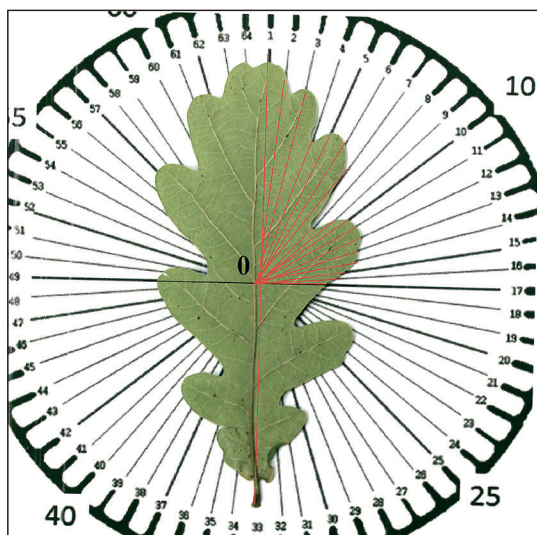


Рис. 1. Лист дуба с обозначением центрмассных расстояний на фоне круга с разметкой на 64 сектора
Fig. 1. Oak leaf with indicated radial distances, superimposed on a circle divided into 64 sectors

Преимуществом метода расчетных коэффициентов является измерение листа неразрушающим способом многократно в динамике роста растения.

Большую продуктивность показали методы на основе программного обеспечения.

Однако в отечественной литературе практически отсутствуют публикации по использованию теории распознавания образов при морфометрическом изучении листьев дуба черешчатого. Настоящая работа является концептуальным предложением использования контурного анализа при изучении морфометрии листьев дуба.

Цель работы

Цель работы — разработка приемов измерения морфометрических показателей листьев на основе методов контурного анализа для изучения генетического разнообразия (внутривидовой дифференциации популяций) *Quercus robur* L. Linnaeus, 1753.

Материалы и методы

Возможность и целесообразность применения контурного анализа для получения морфометрических показателей рассматривались на пяти лесосеменных плантациях и одном участке испытательных культур плюсовых деревьев дуба черешчатого в Воронежской и Тамбовской областях. Проведено внутривидовое изучение дуба на примере пяти семей лесосеменной

плантации Александровского участкового лесничества (125 листьев с 25 деревьев).

Результаты и обсуждение

В основе метода контурного анализа используется понятие дескриптора, обозначающего упорядоченную последовательность чисел, характеризующих контур листа [38, 39]. От геометрического центра листа до границ контура можно провести 64 вектора-радиуса (рис. 1). Последовательно измеряя расстояния от центра до пересечения с контуром, начиная с верхней точки и по часовой стрелке, получим массив, который послужит основой для расчета дескрипторов. Дескриптор контура должен быть инвариантен относительно порядка измерений. Однако измеряя лист с обратной стороны, можно получить другую последовательность данных. Для достижения инвариантности массива центрмассных расстояний к последовательности измерений необходимо провести преобразование Фурье данных центрмассных расстояний. В результате расчетов получаем 32 коэффициента. Сравнение дескрипторов контуров листьев с помощью коэффициента корреляции позволяет определить сходство сравниваемых листьев.

Чем больше коэффициент корреляции, тем выше сходство двух сравниваемых листьев.

Преобразование Фурье можно выполнять в программе Microsoft Excel, используя анализ Фурье в блоке «Анализ данных». Функция МНИМ.ABS переводит преобразованные числа в дескрипторы. Из массива полученных дескрипторов для сравнения используются 32 числа (со 2 по 33) из первоначально измеренных 64 радиусов-векторов. Расчет дескрипторов с использованием преобразования Фурье показал стопроцентное их совпадение при изменении порядка измерений радиусов-векторов.

Инвариантность измерений можно устранить, используя средние длины радиусов-векторов. При повороте листа на 180° векторы 0-1 и 0-33 (см. рис. 1) остаются без изменений. По остальным вычисляются средние из векторов 0-1 и 0-64; 0-2 и 0-63; 0-3 и 0-62 и т. д. Всего получается 33 дескриптора. Проверка коэффициентов корреляции по дескрипторам, определенным путем преобразования Фурье и по расчетам по средним радиусам-векторам дает сходные показатели. Так, t -тест между средними коэффициентами корреляции, определенными разными методами, равен 0,203. При этом не совпадают диаграммы последовательности дескрипторов, вычисленных разными способами (рис. 2, 3).

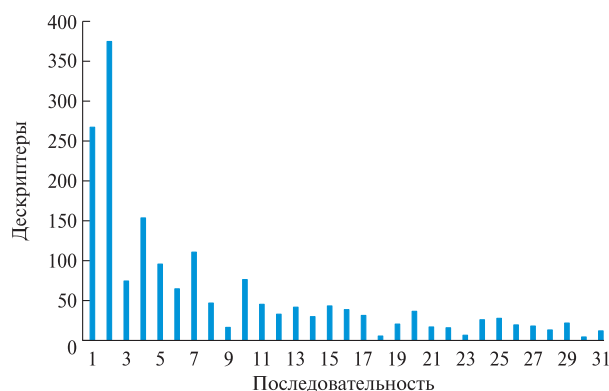


Рис. 2. Диаграмма последовательности дескрипторов после преобразования Фурье радиусов-векторов
Fig. 2. Diagram of the descriptor sequence following the Fourier transform of the radius vectors

Поэтому при сравнении подобия контуров нельзя комбинировать эти показатели, а можно применять только один из рассмотренных способов.

По измеренным радиусам-векторам можно рассчитать и некоторые другие морфометрические показатели листа. Длина складывается из векторов 0-1 (R_1) + 0-33 (R_{33}) (рис. 4).

Ширина определяется как сумма максимальной координаты по X с левой и правой сторон листа ($\sin$ левый + $\sin$ правый) (см. рис. 4), которые рассчитываются через длину радиуса-вектора и значение угла между ним и координатной сеткой.

Расчеты целесообразно выполнять, используя математические функции в программе Microsoft Excel.

Моделируя площадь листа как сумму 64 треугольников, образованных двумя радиусами-векторами и линией, соединяющей их вершины, можно рассчитать периметр и площадь листовой пластинки (рис. 5).

Сторона P определяется по формуле косинусов

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \gamma},$$

где a — длина радиуса-вектора R_1 ;
 b — длина радиуса-вектора R_2 ;
 $\cos \gamma$ — косинус угла между ними.

В данном примере угол между радиусами-векторами составляет 1/64 часть окружности ($5,625^\circ$). Косинус такого угла равен 0,995.

Площадь треугольника вычисляется по формуле Герона

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)},$$

где a, b, c — длины сторон треугольника;
 p — полупериметр треугольника.

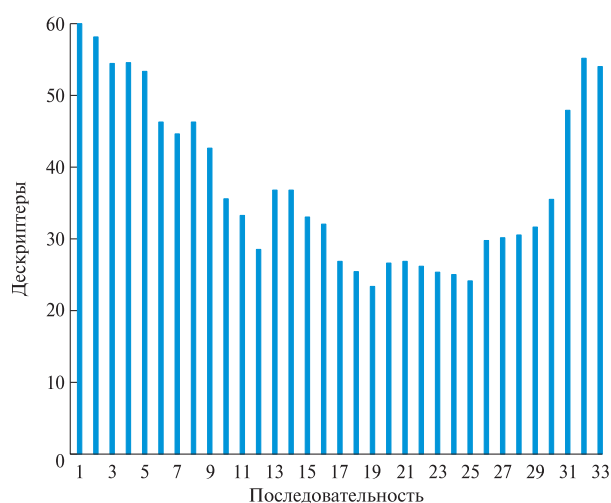


Рис. 3. Диаграмма последовательности дескрипторов по средним радиусам-векторам
Fig. 3. Diagram of the descriptor sequence by radius vector levels

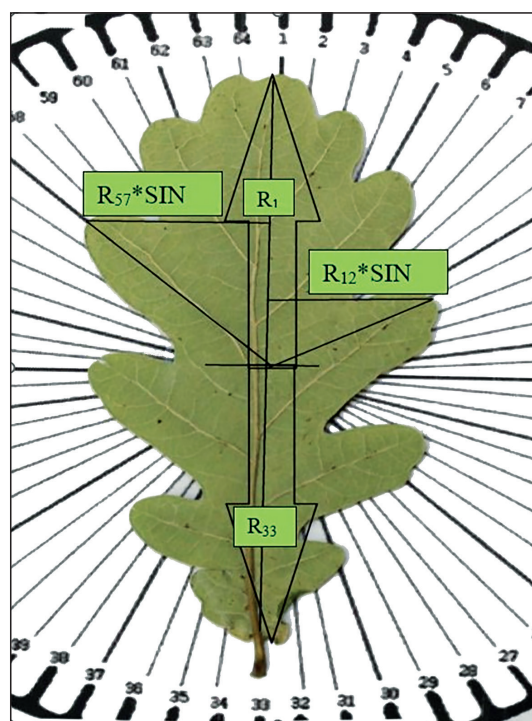


Рис. 4. Схема расчетов длины и ширины листа
Fig. 4. Scheme for calculating leaf length and its width

Полупериметр p вычисляется по формуле

$$p = \frac{a + b + c}{2}.$$

Сумма 64 секторов дает показатели листа. Вычисленные периметры листьев для контроля сравнивали с таковыми фактическими периметрами, измеренными курвиметром, а площади

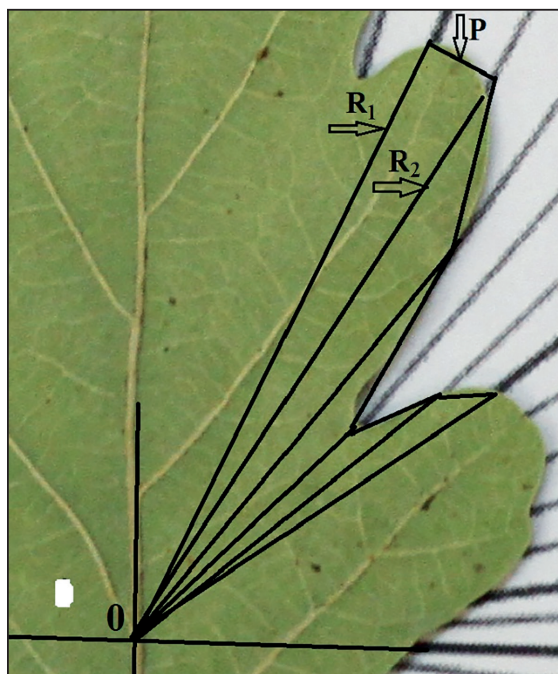


Рис. 5. Стороны треугольника (R_1 , R_2 , P) на фрагменте листа

Fig. 5. Triangle sides (R_1 , R_2 , P) on a leaf fragment

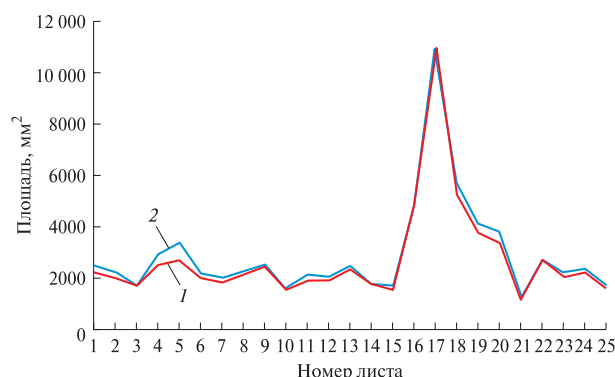


Рис. 6. Расчетные и фактические показатели площади листа: 1 — расчетные; 2 — фактические

Fig. 6. Calculated and actual leaf area values: 1 — calculated; 2 — actual

сравнивали с площадями, измеренными по подсчетам на миллиметровой сетке (рис. 6, 7).

Высокие коэффициенты корреляции между расчетными и контрольными показателями (0,96 — периметр, 0,99 — площадь) указывают на соответствие рассматриваемой модели с природным объектом.

На основе измеренных радиусов-векторов получаем характеристику листьев по 12 показателям (табл. 1):

- 1) длина, мм;
- 2) ширина, мм;
- 3) отношение ширины к длине;

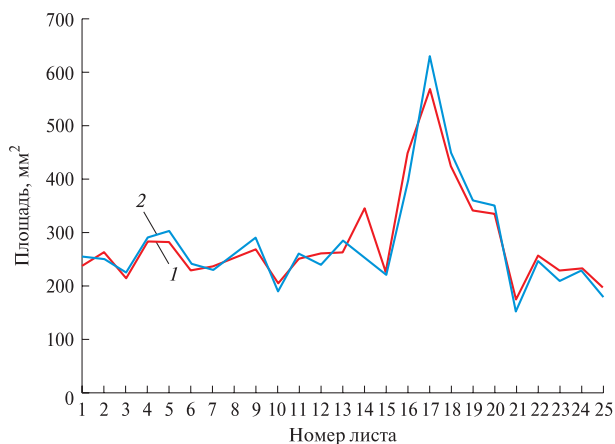


Рис. 7. Расчетные и фактические показатели периметра листа: 1 — расчетные; 2 — фактические

Fig. 7. Calculated and actual leaf perimeter values: 1 — calculated; 2 — actual

- 4) периметр, мм;
- 5) площадь, мм²;
- 6) отношение квадрата периметра к площади;
- 7) асимметрия, %;
- 8) изрезанность, коэффициент вариации радиусов-векторов;
- 9) длина черешка, мм;
- 10) количество лопастей;
- 11) угол жилкования;
- 12) корреляция контуров.

По шкале С.А. Мамаева изменчивость коэффициента корреляции контуров листа относится к очень низкой, угол жилкования — низкий, площадь листа и асимметрия — очень высокие, остальные — средние и повышенные.

По расчету тесноты связи между показателями листьев выявлена зависимость только между длиной и шириной листа (коэффициент корреляции 0,87), а также длиной с периметром и площадью (коэффициенты корреляции 0,92 и 0,94 соответственно) и шириной листовой пластинки с периметром и площадью листовой пластинки (коэффициенты корреляции 0,92 и 0,91 соответственно) (табл. 2).

Зависимость площади от длины листовой пластинки приведена на рис. 8. Уравнение зависимости представляет собой прямую вида $y = 3,2212x - 4,6998$ с коэффициентом детерминации равном 0,8473.

Зависимость площади от длины листовой пластинки приведена на рис. 9. Уравнение зависимости описывается полином второго порядка вида $y = 0,514x^2 - 36,84x + 1787$ с коэффициентом детерминации 0,946.

С помощью регрессионного анализа были разработаны математические модели для вычисления площади и периметра листа. Основ-

Т а б л и ц а 1

**Статистические показатели признаков листьев на лесосеменной плантации
Александровского участкового лесничества (использована программа Statistica)**

Statistical parameters of leaf character at the seed plantation
at the Aleksandrovskoye forestry unit (Statistica software used)

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднее показателя	95	56	0,6	303	3291	30,3	12,7	35,4	5,3	9,1	45,8	0,94
Стандартная ошибка	2	2	0,0	8	183	0,6	1,0	0,5	0,1	0,1	0,4	0,00
Медиана	88	50	0,6	283	2628	29,3	9,5	35,2	5,0	9,0	45,0	0,94
Мода	86	46	0,5	595	0,0	32,0	12,8	35,8	5,0	9,0	45,0	0,94
Стандартное отклонение	25	18	0,1	89	2042	6,8	10,9	5,8	1,6	1,4	4,9	0,04
Дисперсия выборки	635	327	0,0	7940	4 169 144	46,6	119,9	33,5	2,7	2,0	24,1	0,00
Минимум показателя	52	30	0,4	173	925	21,0	0,1	21,0	1,5	6,0	34,0	0,78
Максимум показателя	184	115	1,1	595	12 133	66,0	60,3	57,0	10,0	12,0	58,0	0,99
Коэффициент вариации	26	32	16	29	62	23	86	16	31	15	11	5

Т а б л и ц а 2

Парные коэффициенты корреляции между морфометрическими показателями листьев

Pairwise correlation coefficients between leaf morphometric parameters

Морфометрические показатели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1											
2	0,87	1										
3	0,04	0,52	1									
4	0,92	0,92	0,28	1								
5	0,94	0,91	0,20	0,91	1							
6	0,07	0,19	0,32	0,36	0,00	1						
7	0,02	0,04	0,05	0,04	0,02	0,06	1					
8	-0,19	-0,37	-0,41	-0,21	-0,36	0,36	0,35	1				
9	0,45	0,37	0,00	0,42	0,46	-0,09	-0,06	-0,17	1			
10	0,22	0,14	-0,11	0,19	0,18	0,07	-0,03	0,07	-0,12	1		
11	-0,09	0,01	0,16	-0,05	-0,01	-0,10	0,05	-0,24	0,00	-0,07	1	
12	-0,04	-0,29	-0,56	-0,31	-0,11	-0,54	-0,12	0,13	-0,08	0,20	0,11	1

ным параметром, необходимым для расчетов, является длина листа. Высокие показатели совпадений уравнений моделей с фактическими данными ($R^2 = 0,8473$ и $0,9466$) указывают на возможность определения периметров и площади листьев по их длине.

Для упрощения использования уравнений была разработана схема (табл. 3), по которой, зная длину листа дуба черешчатого, можно определить его площадь и периметр. Этот метод позволил ускорить процесс измерения в полевых условиях, не удаляя листья с живых растений, а также проследить динамику роста в процессе вегетации. Внедрение схемы в практику упростит выполнение подобных расчетов.

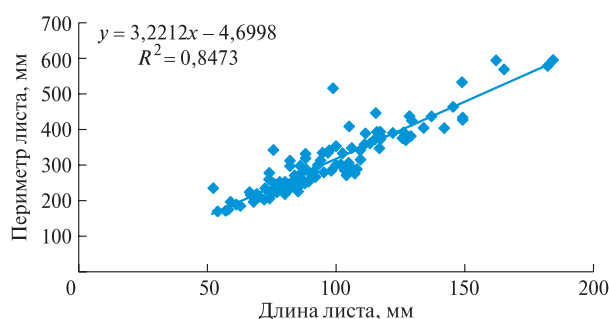


Рис. 8. Линейная зависимость периметра листа дуба черешчатого от его длины

Fig. 8. Linear relationship between the perimeter of a pedunculate oak leaf and its length

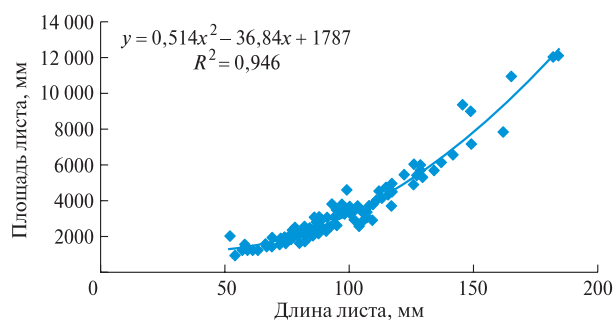


Рис. 9. Полиномиальная зависимость площади листа дуба черешчатого от его длины

Fig. 9. Polynomial relationship between pedunculate oak leaf surface and length

Т а б л и ц а 3

Схема для расчетов площади и периметра листовой пластины в зависимости от ее длины

Scheme for calculating leaf blade surface and perimeter depending on its length

Номер образца листа	Длина, мм	Периметр, мм	Площадь, мм²
1	50	156	1231
2	75	237	1917
3	100	317	3246
4	125	398	5219
5	150	478	7834
6	175	559	11 092
7	200	640	14 993

Полученные посредством обработки радиусов-векторов данные можно использовать в расчетах изменчивости признаков листьев на дереве, внутри семьи или в локальных популяциях (рис. 10). На рис. 10 видна четкая закономерность по всем показателям морфологии листа. Наименьшая изменчивость наблюдается внутри растения, выше — в семьях и наибольшая изменчивость характерна для местной популяции.

Обработка данных дисперсионным анализом позволяет установить значение силы влияния семьи на изменчивость морфологических показателей листьев (рис. 11). Данный анализ широко применяется при изучении морфометрии растений в лесоводственных исследованиях [40, 41].

Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил преимущественное достоверное влияние происхождения (семей) на изменчивость: длины листа, периметра листовой пластинки, длины черешка, количества лопастей и угла жилкования. Критерий Фишера по этим показателям был выше критического (2,46) в 2 раза и более.

Различия в показателях изменчивости в популяции, семьи и внутри дерева проявляется не только у отдельных морфологических признаков, но и при их совместном сочетании. На рис. 12 представлена изменчивость коэффициента дивергенции, который показывает оценку разнообразия по комплексу показателей. Изменчивость определялась по коэффициенту вариации полученных рядов. Показатель группировался по деревьям и семьям. Приведены

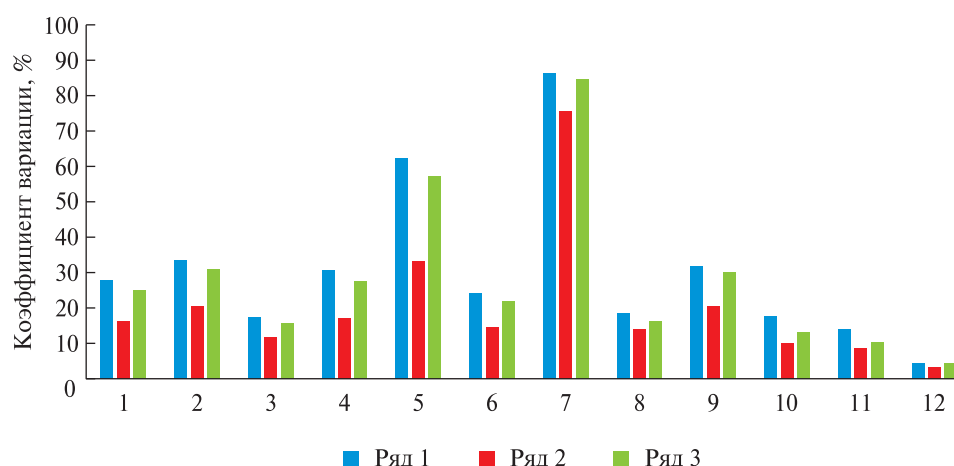


Рис. 10. Диаграмма изменчивости признаков: 1 — внутри популяции; 2 — эндогенная на дереве; 3 — внутрисемейная

Fig. 10. Diagram of characteristic variability: 1 — within-population; 2 — endogenous (within-tree); 3 — within-family

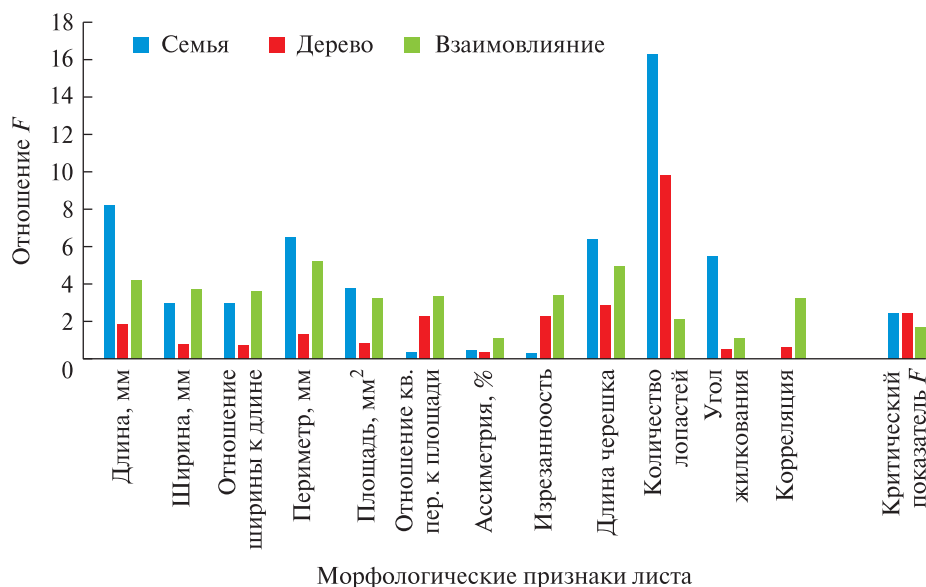


Рис. 11. Доля влияния происхождения (семьи) на изменчивость морфологических показателей листа

Fig. 11. Proportion of the origin (family) influence on the variability of leaf morphological indicators

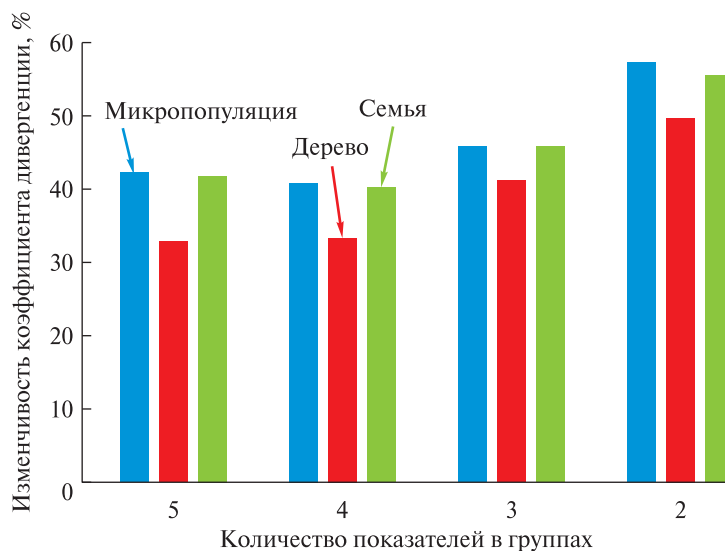


Рис. 12. Коэффициент дивергенции по группам: 5 — длина листа + ширина листа + длина черешка + количество лопастей + угол жилкования; 4 — ширина листа + длина черешка + количество лопастей + угол жилкования; 3 — длина листа + количество лопастей + угол жилкования; 2 — длина листа + количество лопастей

Fig. 12. Divergence coefficient by groups: 5 — leaf length + leaf width + petiole length + number of lobes + venation angle; 4 — leaf width + petiole length + number of lobes + venation angle; 3 — leaf length + number of lobes + venation angle; 2 — leaf length + number of lobes

четыре группы, состоящие из двух — пяти показателей, которые наиболее точно характеризуют потомство конкретного дерева. Наряду с ранее выполненными оценками налицо про-

явление общей закономерности увеличения изменчивости в зависимости от уровня иерархической структуры вида от внутри организменного, далее семейного к популяционному.

Определение значения коэффициента дивергенции рассчитывалось как разница между значениями по морфометрическому признаку листа на дереве, в семье и средним значением выборки из микропопуляции. Значение колебаний выражалось в долях нормированного отклонения показателя.

Коэффициент дивергенции [42] рассчитывался по формуле

$$КД = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-1}},$$

где $\sum \delta^2$ — сумма квадратов отклонений признака от средней величины; n — число признаков.

Выводы

Предложенные приемы изучения позволяют оценить сходство листьев дуба черешчатого по внешним контурам, определить еще 11 морфометрических показателей, представить статистическую характеристику каждого признака, показать уровень взаимосвязей между ними, продемонстрировать изменчивость морфологии листа внутри дерева, семьи, популяции. По уравнению зависимости площади листовой пластинки от длины листа $y = 0,5144x^2 - 36,848x + 1787$ определяется листовая поверхность растения на растущих ветвях.

Определение периметра рассчитывается по формуле $y = 3,2212x - 4,6998$. Полученные уравнения регрессии площади и периметра листовой пластины дуба от длины листа позволяют определять данные параметры с высокой точностью.

На основании измерений листьев на растениях лесосеменной плантации проявляется общая закономерность уменьшения изменчивости морфологических показателей в ряду структурных единиц от популяции до индивидуального дерева.

Список литературы

- [1] Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (дата обращения 01.04.2026).
- [2] Мусиевский А.Л., Капитонов Д.Ю., Нартова И.М., Милигула Е.Н. Проблема исчезновения дуба как лесообразующей породы // Актуальные вопросы лесной генетики, селекции и биотехнологии: сб. науч. тр. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию юбилею ФГБУ «ВНИИЛГИСБиотех», Воронеж, 28 ноября 2025 г. Воронеж: Типография «Лондон», 2025. С. 76–78.
- [3] Зорин В.П. Воспроизводство и повышение продуктивности дубрав // Дуб — порода третьего тысячелетия: сб. науч. тр. Института леса НАН Беларуси / ред. В.Ф. Багинский. Гомель: Институт леса Национальной академии наук Беларуси, 1998. 400 с.
- [4] Харченко Н.А., Михно В.Б., Харченко Н.Н., Царалунга В.В., Корчагин О.М., Матвеев С.М., Мельников Е.Е., Заплетин В.Ю. Деградация дубрав Центрального Черноземья / под ред. Н.А. Харченко. Воронеж: ВГЛТА, 2010. 604 с.
- [5] Шутяев А.М. Биоразнообразие дуба черешчатого и его использование в селекции и лесоразведении. Воронеж: Истоки, 2000. 336 с.
- [6] Проект распоряжения Правительства Российской Федерации об утверждении Стратегии сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия Российской Федерации на период до 2036 года. URL: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/967/5muk0h6530qlmdouyxa50ephzyllkopc1/проект-распоряжения-Правительства-Российской-Федерации.pdf> (дата обращения 14.04.2026).
- [7] Федеральный закон от 30.11.2024 г. № 428-ФЗ «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений в статью 29 Федерального закона “О животном мире”». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202411300018?ysclid=mnkytbe04j318692702> (дата обращения 10.04.2026).
- [8] Kramer K., van der Werf B., Schelhaas M.-J. Bring in the genes: genetic-ecophysiological modeling of the adaptive response of trees to environmental // Functional Plant Ecology, Frontiers in Plant Science, 2015, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.3389/fpls.2014.00742
- [9] Тюрин А., Наumenko И., Воропанов П. Лесная вспомогательная книжка (по таксации леса). М.: Рослесбумиздат, 1956. 532 с.
- [10] Каплина Н.Ф. Изучение динамики годичной продукции древостоя дуба на постоянной пробной площади в Теллермановском лесу // Состояние особо охраняемых природных территорий европейской части России: сб. науч. статей, посвященный 70-летию Хоперского заповедника, пос. Варварино, Воронежская область, 20–23 сентября 2005 г. Воронеж: Изд-во ВГЛТУ, 2005. 640 с.
- [11] Каплина Н.Ф., Жиренко Н.Г. Динамика фитомассы листьев, состояния и развития крон деревьев нагорной дубравы юго-восточной лесостепи в неблагоприятных условиях последнего десятилетия // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2012. № 2. С. 3–11.
- [12] Углянец А.В., Гарбарук Д.К. Оценка запаса лесных горючих материалов в компонентах дубовых лесов ближней зоны ЧАЭС и содержания в них ^{137}Cs и ^{90}Sr // Ботаника. Исследования, 2023. № 52. С. 143–154.
- [13] Голыдкина И.В., Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н., Шешнищан Т.Л., Сафонова А.А. Количественная оценка сезонного растительного опада в Воронежской нагорной дубраве // Лесотехнический журнал, 2025. № 3. С. 61–74.
- [14] Феногенетическая изменчивость: сборник работ / под ред. Н.П. Кренке. Т. 1. М.: Изд-во Биологического ин-та им. К.А. Тимирязева при ученом комитете ЦИК СССР, 1933–1935, 755 с.
- [15] Семериков Л.Ф. Популяционная структура древесных растений (на примере видов дуба европейской части СССР и Кавказа). М.: Наука, 1986. 138 с.

- [16] Малеев В.П. Обзор дубов Кавказа в их систематических и географических отношениях и в связи с эволюцией // Ботанический журнал, 1935. Т. 20. № 9 2/3. С. 157–177, 292–321.
- [17] Красильников Д.И. Изменчивость дубов Западного Кавказа и ее значение в таксономии: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Л., Изд-во БИН АН СССР, 1962. 42 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] Животовский Л.А. Популяционная биометрия. М.: Наука, 1991. 271 с.
- [20] Шутяев А.М. Биоразнообразие дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и его использование в селекции и лесоразведении: дис. ... д-ра с.-х. наук, 06.03.01. Воронеж, 1998. 382 с.
- [21] Кулаков Е.Е., Бушуева А.С. Оценка морфометрических параметров листовой пластины *Quercus robur* L. на лесосеменной плантации в Кирсановском лесничестве Тамбовской области // Биотехнологии в инновационном лесоразведении и лесовосстановлении, мониторинг лесных и лесомелиоративных систем: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 07 июня 2024 г. Воронеж: Изд-во ВГЛУ, 2024. С. 96–101. DOI: 10.58168/BIARMFFRS2024_96-101
- [22] Rellstab C., Bühler A., Graf R., Folly C., Gugerli F. Using joint multivariate analyses of leaf morphology and molecular-genetic markers for taxon identification in three hybridizing European white oak species (*Quercus* spp.) // Annals of Forest Science, 2016, no. 73, pp. 669–679. <https://doi.org/10.15468/34crvb>
- [23] Kremer A., Dupouey J.L., Deans J.D., Cottrell J., Csaikl U., Finkeldey R., Espinel S., Jensen J., Kleinschmit J., van Dam B., Ducousso A., Forrest I., Lopez de Heredia U., Lowe A.J., Tutkova M., Munro R.C., Steinhoff S., Badeau V. Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. Annals of Forest Science, 2002, vol. 59, no. 7, pp. 777–787. DOI: 10.1051/forest:2002065
- [24] Sandurska E., Ulaszewski B., Burczyk J. Genetic diversity and differentiation of coexisting populations of *Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (matt.) Liebl // Acta biologica cracoviensia Series Botanica, 2019, no. 61/1, pp. 17–28. DOI: 0.24425/abcsb.2019.127739
- [25] Jovanovic M., Milovanovic J., Nonic M., Sijacic-Nikolic M., Kerkez Jankovic I., Grbovic F. The Effects of Soil Type, Exposure and Elevation on Leaf Size and Shape in *Quercus cerris* L. // South-east Eur for, 2023, no. 14(1), pp. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.23-08>
- [26] Jovanovic M., Kerkez Jankovic I., Milovanovic J., Nonic M., Sijacic-Nikolic M. Intraspecific Variability of *Quercus pubescens* Willd. Leaves from the Outstanding Natural Landscape «Kosmaj» in Serbia // Biology Bulletin, 2024, v. 51, no. 2, pp. 302–313. DOI: 10.1134/S1062359023603877
- [27] López De Heredia U., Duro-García M.J., Soto A. Leaf morphology of progenies in *Quercus suber*, *Quercus ilex*, and their hybrids using multivariate and geometric morphometric analysis // iForest, 2018, no. 11, pp. 90–98. DOI: 10.3832/ifor2577-010
- [28] Попова А.А. Биотическая изменчивость и селекция дуба черешчатого в центральной лесостепи: дис. ... д-ра с.-х. наук, 06.03.01. Воронеж, 2021, 386 с.
- [29] Путенихин В.П., Фарушкина Г.Г. Фенотипическая изменчивость *Quercus robur* L. в Южном Приуралье // Вестник Оренбургского государственного университета, 2011. № 12(131). С. 122–123.
- [30] Демаков Ю.П., Краснов В.Г., Кириллов С.В., Смышляева М.И., Антропова А. В. Информативность морфометрических параметров деревьев, желудей и листьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в географических культурах // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2015. № 3 (27). С. 18–33.
- [31] Конюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений. Томск: Изд-во ТГУСУР, 2012. 105 с.
- [32] Уткина И.А., Рубцов В.В., Дудоров А.В. Определение площади листьев дуба по их линейным размерам // Лесоведение, 1997. № 4. С. 49–55.
- [33] Киселева Н.С. Способ вычисления площади листа груши по линейным измерениям с помощью расчетных коэффициентов и методов вариационной статистики // Сельскохозяйственная биология, 2017. Т. 52. № 1. С. 211–217. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211rus
- [34] Патент № 2477039 С1 Российская Федерация, МПК A01G 7/00, G01B 5/20. Способ измерения формы листьев у древесных растений / Мазуркин П.М., Малинина Е.С., заявитель и патентообладатель «Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Марийский государственный технический университет». № 2011138039/13; заявл. 15.09.2011; опубл. 10.03.2013.
- [35] Тихомирова З.В. Козлов Д.Ю., Соколова Г.Г. Разработка алгоритма измерения морфологических признаков листьев вяза мелколистного с помощью компьютерного зрения // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии, 2025. Т. 9. № 1. С. 163–169.
- [36] Liu Y., Li Y., Song J., Zhang R., Yan Y., Wang Y., Du F.K. Geometric morphometric analyses of leaf shapes in two sympatric Chinese oaks: *Quercus dentata* Thunberg and *Quercus aliena* Blume (Fagaceae) // Annals of Forest Science, 2018, v. 75(4), pp. 6–12. DOI: 10.1007/s13595-018-0770-2
- [37] Дорофеева М.М., Бонечкая С.А. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методов определения площади листовой поверхности // Растительные ресурсы, 2020. Т. 56. № 2. С. 182–192. <https://doi.org/10.31857/S0033994620020041>
- [38] Макаров М.А., Андреев С.Ю. Контурный анализ в задачах распознавания и классификации объектов // Научная визуализация, 2014. Т. 6. № 3. С. 77–86.
- [39] Фурман Я.А. Введение в контурный анализ. М.: Физматлит, 2003. 561 с.
- [40] Бессчетнова Н.Н., В.П., Бессчетнов В.П., Метелкин Н.А., Шайфлер И.А. Создание лесных культур сосны сеянцами с закрытой и открытой корневой системой в правобережье Нижегородского Поволжья // Хвойные бореальной зоны, 2025. Т. 43. № 6. С. 21–31. DOI 10.64430/1993-0135-2025-6-21-31
- [41] Мигалина С.В., Иванова Л.А., Махнев А.К. Изменение морфологии листа *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. Вдоль зонально-климатической трансекты Урала и Западной Сибири // Экология, 2010. № 4. С. 257–265.
- [42] Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во Ленинградского гос. ун-та, 1984, 288 с.

Сведения об авторах

Царев Анатолий Петрович — д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотр. отдела селекции семеноводства, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», antsa-55@yandex.ru

Кострикин Виктор Андреевич — канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр. отдела селекции семеноводства, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», v.kostrikin2015@yandex.ru

Недорезова Елена Викторовна — канд. техн. наук, инженер научно-технического отдела, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», nedorezova.biotex@internet.ru

Поступила в редакцию 05.04.2026.

Одобрено после рецензирования 23.06.2026.

Принята к публикации 10.09.2026.

MORPHOMETRIC PARAMETERS ASSESSMENT OF PEDUNCULATE OAK (*QUERCUS ROBUR* L.) LEAVES BASED ON RADIUS-VECTOR MEASUREMENTS

A.P. Tsarev[✉], V.A. Kostrikin, E.V. Nedorezova

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosova st., 394087, Voronezh, Russia

antsa-55@yandex.ru

The article examines the possibility and feasibility of using contour analysis to obtain morphometric parameters of leaves of Pedunculate oak (*Quercus robur* L.). The studies were carried out at five seed plantations and one plot of plus trees progeny test in the Voronezh and Tambov regions; as an example, data are provided for five families from the seed plantation of the Aleksandrovskoe forestry unit (125 leaves from 25 trees). The method for constructing leaf contour descriptors based on 64 centroidal radius vectors is described, using either Fourier transform or the calculation of the average lengths of the radius vectors. It is shown that both approaches yield similar correlation coefficients (t -test = 0,203); however, their descriptors cannot be combined when comparing contour similarity. Based on the measured radius vectors, morphometric parameters (leaf width, perimeter, surface, etc.) were calculated, and their reliability was verified by comparison with control measurements (using a curvimeter and millimeter grid): the correlation coefficients were 0,96 (for perimeter) and 0,99 (for area). Using variance, correlation, and regression analyses, the variability of morphological characteristics was assessed and patterns identified, the lowest variability is observed within a plant, higher variability is found within families, and the greatest variability occurs in the local population. A significant influence of origin (families) on the variability of a number of morphometric parameters has been confirmed. Mathematical models have been developed to calculate leaf area and perimeter based on its length. A reference scheme has been created to enable rapid determination of these parameters in the field without removing leaves from the plants. The results can be applied in forestry research, breeding, and monitoring the variability of characteristics in oak populations.

Keywords: pedunculate oak, *Quercus robur* L., genetic diversity, variation, maternal tree families, morphometric parameters, contour analysis, Fourier transform

Suggested citation: Tsarev A.P., Kostrikin V.A., Nedorezova Ye.V. *Opredeleeniye morfometricheskikh pokazateley lista duba chereschatogo (Quercus robur L.) na osnove izmereniy radiusov-vektorov* [Morphometric parameters assessment of Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) leaves based on radius-vector measurements]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 17–31.

DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-17-31

References

- [1] *Ukaz Prezidenta ot 18.06.2024 № 529 Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya i perechnya vazhneyshikh naukoemkikh tekhnologiy* [Presidential Decree of June 18, 2024 No. 529 On Approval of Priority Areas of Scientific and Technological Development and the List of Critical High-Tech Technologies]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (accessed 01.04.2026).
- [2] Musievskii A.L., Kapitonov D.Yu., Nartova I.M., Miligula E.N. *Problema ischeznoveniya duba kak lesoobrazuyushchey porody* [The problem of pedunculate oak disappearance as a forest-forming tree species]. Aktual'nye voprosy lesnoy genetiki, selektsii i biotekhnologii: sb. nauch. tr. nauch.-prakt. konf., priurochennoy k 55-letnemu yubileyu FGBU «VNIILGISbiotek» [Current Issues in Forest Genetics, Breeding and Biotechnology: Collected Papers of the Scientific-Practical Conference Dedicated to the 55th Anniversary of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology] Voronezh, 28 November 2025. Voronezh: Tipografiya London, 2025, pp. 76–78.
- [3] Zorin V.P. *Vosproizvodstvo i povyshenie produktivnosti dubrav* [Reproduction and increasing the productivity of oak forests]. Dub — poroda tret'ego tysyacheletiya: sb. nauch. tr. [Oak — The Tree Species of the Third Millennium: Collected Papers]. Gomel: Institut lesa NAN Belarusi, 1998, pp. 5–9.
- [4] Kharchenko N.A., Mikhno V.B., Kharchenko N.N., Tsaralunga V.V., Korchagin O.M., Matveev S.M., Mel'nikov E.E., Zapletin V.Yu. *Degradatsiya dubrav Tsentral'nogo Chernozem'ya* [Degradation of oak forests in the Central Chernozem Region]. Ed. N.A. Kharchenko. Voronezh: VGLTA, 2010, 604 p.
- [5] Shutyaev A.M. *Bioraznoobrazie duba chereschatogo i ego ispol'zovanie v selektsii i lesorazvedenii* [Biodiversity of pedunculate oak and its use in breeding and afforestation]. Voronezh: Istoki, 2000, 336 p.
- [6] *Proekt Strategii Sokhraneniya i ustoychivogo ispol'zovaniya biologicheskogo raznoobraziya Rossiyskoy Federatsii na period do 2036 goda* [Draft Strategy for the Conservation and Sustainable Use of Biological Diversity of the Russian Federation for the Period up to 2036]. Project of the Government Order of the Russian Federation, 2025, 175 p. Available at: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/967/5muk0h6530qlmdouyxa50ephzylkopcl/proekt-rasporyazheniya-Pravitel'stva-Rossiyskoy-Federatsii.pdf> (accessed 14.04.2026).
- [7] *Federal'nyy zakon ot 30.11.2024 № 428-FZ «O bioresursnykh tsentrakh i biologicheskikh (bioresursnykh) kollekttsiyakh i o vnesenii izmeneniy v stat'yu 29 Federal'nogo zakona “O zhivotnom mire”»* [Federal Law of November 30, 2024, no. 428-FZ «On Bioresource Centers and Biological (Bioresource) Collections and on Amendments to Article 29 of the Federal Law «On Wildlife»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202411300018> (accessed 10.04.2026).
- [8] Kramer K., van der Werf B., Schelhaas M.-J. Bring in the genes: genetic-ecophysiological modeling of the adaptive response of trees to environmental // Functional Plant Ecology, Frontiers in Plant Science, 2015, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.3389/fpls.2014.00742
- [9] Tyurin A., Naumenko I., Voropanov P. *Lesnaya vspomogatel'naya knizhka (po taksatsii lesa)* [Forest Auxiliary Handbook (on Forest Inventory)]. Moscow: Roslesbumizdat, 1956, 532 p.
- [10] Kaplina N.F. *Izuchenie dinamiki godichnoy produktsii drevostoya duba na postoyannoy probnoy ploshchadi v Tellermanovskom lesu* [Study of the dynamics of annual oak stand production on a permanent sample plot in the Tellerman Forest]. Sostoyaniye osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy evropeyskoy chasti Rossii [State of Specially Protected Natural Areas of the European Part of Russia]. Voronezh: Voronezh State University, 2005, 640 p.
- [11] Kaplina N.F., Zhirenko N.G. *Dinamika fitomassy list'ev, sostoyaniya i razvitiya kron derev'ev nagornoy dubravy yugovostochnoy lesostepi v neblagopriyatnykh usloviyakh poslednego desyatiletiya* [Dynamics of leaf phytomass, condition and development of crowns in upland oak forests of the south-eastern forest-steppe under unfavorable conditions of the last decade]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie, 2012, no. 2, pp. 3–11.
- [12] Uglyanets A.V., Garbaruk D.K. *Otsenka zapasa lesnykh goryuchikh materialov v komponentakh dubovykh lesov blizhney zony CHAES i sodержaniya v nikh ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr* [Assessment of forest fuel load in components of oak forests in the near zone of the Chernobyl NPP and the content of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in them]. Botanika. Issledovaniya, 2023, no. 52, pp. 143–154.
- [13] Golyadkina I.V., Odnoralov G.A., Tikhonova E.N., Sheshnitsan T.L., Safonova A.A. *Kolichestvennaya otsenka sezonnogo rastitel'nogo opada v Voronezhskoy nagornoy dubrave* [Quantitative assessment of seasonal plant fall in the Voronezh upland oak forest]. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forest Technical Journal], 2025, no. 3, pp. 61–74.
- [14] *Phenogenetic variability: a collection of works* / ed. N.P. Krenke. Vol. 1. Moscow: Publishing house of the K.A. Timiryazev Biological Institute under the Scientific Committee of the Central Executive Committee of the USSR, 1933–1935, 1933–1935, 755 p.
- [15] Semerikov L.F. *Populyatsionnaya struktura drevesnykh rasteniy (na primere vidov duba evropeyskoy chasti SSSR i Kavkaza)* [Population structure of woody plants (on the example of oak species in the European part of the USSR and the Caucasus)]. Moscow: Nauka, 1986, 138 p.
- [16] Maleev V.P. *Obzor dubov Kavkaza v ikh sistematicheskikh i geograficheskikh otnosheniyakh i v svyazi s evolyutsiei* [Review of Caucasian oaks in their systematic and geographical relations and in connection with evolution]. Botanicheskiy zhurnal [Botanical Journal], 1935, v. 20, no. 9 (2/3), pp. 157–177, 292–321.
- [17] Krasil'nikov D.I. *Izmenchivost' dubov Zapadnogo Kavkaza i ee znachenie v taksonomii* [Variability of oaks of the Western Caucasus and its significance in taxonomy]. Author's abstract Dis. Dr. Sci. (Biol.). Leningrad: BIN AN SSSR, 1962, 42 p.
- [18] Mamaev S.A., Gorchakovskiy S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh 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: Nauka, 1972, 284 p.

- [19] Zhivotovskiy L.A. *Populyatsionnaya biometriya* [Population biometry]. Moscow: Nauka, 1991, 271 p.
- [20] Shutyaev A.M. *Bioraznoobrazie duba chereschatogo (Quercus robur L.) i ego ispol'zovanie v selektsii i lesorazvedenii* [Biodiversity of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and its use in breeding and afforestation]. Dis. Dr. Sci. (Agric.), 06.03.01. Voronezh, 1998, 382 p.
- [21] Kulakov E.E., Bushueva A.S. *Otsenka morfometricheskikh parametrov listovoy plastiny Quercus robur L. na lesosemen noy plantatsii v Kirsanovskom lesnichestve Tambovskoy oblasti* [Assessment of morphometric parameters of the leaf blade of *Quercus robur* L. at a seed orchard in the Kirsanov forestry of Tambov region]. *Biotehnologii v innovatsionnom lesorazvedenii i lesovosstanovlenii, monitoring lesnykh i lesomeliorativnykh sistem: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf. [Biotechnologies in innovative afforestation and reforestation, monitoring of forest and forest reclamation systems: Proc. All-Russian Sci.-Pract. Conf.]*. Voronezh, 2024, pp. 96–101. DOI: 10.58168/BIARMFFRS2024_96-101
- [22] Rellstab C., Böhler A., Graf R., Folly C., Gugerli F. Using joint multivariate analyses of leaf morphology and molecular-genetic markers for taxon identification in three hybridizing European white oak species (*Quercus spp.*). *Annals of Forest Science*, 2016, no. 73, pp. 669–679. <https://doi.org/10.15468/34crvb>
- [23] Kremer, A., Dupouey J.L., Deans J.D., Cottrell J., Csaikl U., Finkeldey R., Espinel S., Jensen J., Kleinschmit J., Dam B. van, Ducouso A., Forrest I., Lopez de Heredia, U., Lowe A.J., Tutkova M., Munro R.C., Steinhoff S., Badeau V. Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. *Annals of Forest Science*, 2002, no. 59(7), pp. 777–787. DOI: 10.1051/forest:2002065.
- [24] Sandurska E., Ulaszewski B., Burczyk J. Genetic diversity and differentiation of coexisting populations of *Quercus robur* L. and *Q. Petraea* (matt.) Liebl. *Acta biologica cracoviensia Series Botanica*, 2019, no. 61/1, pp. 17–28. DOI: 0.24425/abscb.2019.127739
- [25] Jovanovic M., Milovanovic J., Nonic M., Sijacic-Nikolic M., Kerkez Jankovic I., Grbovic F. The Effects of Soil Type, Exposure and Elevation on Leaf Size and Shape in *Quercus cerris* L. *South-east Eur for*, 2023, no.14(1), pp. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.23-08>
- [26] Jovanovic M., Kerkez Jankovic I., Milovanovic J., Nonic M., Sijacic-Nikolic M. Intraspecific Variability of *Quercus pubescens* Willd. Leaves from the Outstanding Natural Landscape «Kosmaj» in Serbia. *Biology Bulletin*, 2024, v. 51, no. 2, pp. 302–313. DOI: 10.1134/S1062359023603877
- [27] López De Heredia U., Duro-García M.J., Soto A. Leaf morphology of progenies in *Q. suber*, *Q. ilex*, and their hybrids using multivariate and geometric morphometric analysis. *iForest*, 2018, no. 11, pp. 90–98. DOI: 10.3832/for2577-010
- [28] Popova A.A. *Bioticheskaya izmenchivost' i selektsiya duba chereschatogo v tsentral'noy lesostepi* [Biotic variability and breeding of pedunculate oak in the central forest-steppe]. Dis. Dr. Sci. (Agric.) 06.03.01. Voronezh, 2021, 386 p.
- [29] Putenikhin V.P., Farukshina G.G. *Fenotipicheskaya izmenchivost' Quercus robur L. v Yuzhnom Priural'e* [Phenotypic variability of *Quercus robur* L. in the Southern Urals]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Orenburg State University]*, 2011, no. 12(131), pp. 122–123.
- [30] Demakov Yu.P., Krasnov V.G., Kirillov S.V., Smyshlyaeva M.I., Antropova A.V. *Informativnost' morfometricheskikh parametrov derev'ev, zheludey i list'ev duba chereschatogo (Quercus robur L.) v geograficheskikh kul'turakh* [Informativeness of morphometric parameters of trees, acorns and leaves of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in geographical plantations]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]*, 2015, no. 3(27), pp. 18–33.
- [31] Konyukhov A.L. *Rukovodstvo k ispol'zovaniyu programmnoy kompleksa ImageJ dlya obrabotki izobrazheniy* [Guide to using the ImageJ software package for image processing]. Tomsk: TUSUR, 2012, 105 p.
- [32] Utkina I.A., Rubtsov V.V., Dudorov A.V. *Opreделение ploshchadi list'ev duba po ikh lineynym razmeram* [Determination of oak leaf area by their linear dimensions]. *Lesovedenie [Forest Science]*, 1997, no. 4, pp. 49–55.
- [33] Kiseleva N.S. *Sposob vychisleniya ploshchadi lista grushi po lineynym izmereniyam s pomoshch'yu raschetnykh koeffitsientov i metodov variatsionnoy statistiki* [Method for calculating pear leaf area by linear measurements using calculated coefficients and variation statistics methods]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2017, v. 52, no. 1, pp. 211–217. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.211-rus
- [34] Patent no. 2477039 *CI Rossiyskaya Federatsiya, MPK A01G 7/00, G01B 5/20. Sposob izmereniya formy list'ev u drevesnykh rasteniy* [Method for measuring the shape of leaves in woody plants]. Mazurkin P.M., Malinina E.S. Applicant and patent holder Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, no. 2011138039/13, appl. 15.09.2011, publ. 10.03.2013.
- [35] Tikhomirova Z.V., Kozlov D.Yu., Sokolova G.G. *Razrabotka algoritma izmereniya morfologicheskikh priznakov list'ev vyaza melkolistnogo s pomoshch'yu komp'yuternogo zreniya* [Development of an algorithm for measuring morphological traits of Siberian elm leaves using computer vision]. *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii [High-performance computing systems and technologies]*, 2025, v. 9, no. 1, pp. 163–169.
- [36] Liu Y., Li Y., Song J., Zhang R., Yan Y., Wang Y., Du F.K. Geometric morphometric analyses of leaf shapes in two sympatric Chinese oaks: *Quercus dentata* Thunberg and *Quercus aliena* Blume (Fagaceae). *Annals of Forest Science*, 2018, v. 75(4), pp. 6–12. DOI: 10.1007/s13595-018-0770-2
- [37] Dorofeeva M.M., Bonetskaya S.A. *Sravnitel'nyy analiz nekotorykh klassicheskikh i sovremennykh metodik opredeleniya ploshchadi listovoy poverkhnosti* [Comparative analysis of some classical and modern methods for determining leaf surface area]. *Rastitel'nye resursy [Plant Resources]*, 2020, v. 56, no. 2, pp. 182–192.
- [38] Makarov M.A., Andreev S.Yu. *Konturnyy analiz v zadachakh raspoznavaniya i klassifikatsii ob'ektov* [Contour analysis in object recognition and classification tasks]. *Nauchnaya vizualizatsiya [Scientific Visualization]*, 2014, v. 6, no. 3, pp. 77–86.

- [39] Furman Ya.A. *Vvedenie v konturnyy analiz* [Introduction to contour analysis]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 561 p.
- [40] Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Metelkin N.A., Shayfler I.A. *Sozdanie lesnykh kul'tur sosny seyantsami s zakrytoy i otkrytoy kornevoy sistemoy v pravoberezh'e Nizhegorodskogo Povolzh'ya* [Creation of pine forest plantations with closed and open root systems in the right bank of the Nizhny Novgorod Volga region]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Zone], 2025, v. 43, no. 6, pp. 21–31. DOI: 10.64430/1993-0135-2025-6-21-31
- [41] Migalina S.V., Ivanova L.A., Makhnev A.K. *Izmenenie morfologii lista Betula pendula Roth i B. pubescens Ehrh. vdol' zonal'no-klimaticheskoy transekty Urala i Zapadnoy Sibiri* [Change in leaf morphology of *Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh. along the zonal-climatic transect of the Urals and Western Siberia]. *Ekologiya* [Ecology], 2010, no. 4, pp. 257–265.
- [42] Shmidt V.M. *Matematicheskie metody v botanike* [Mathematical methods in botany]. Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta, 1984, 288 p.

Authors' information

Tsarev Anatoliy Petrovich ✉ — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Chief Researcher at the Department of Breeding and Seed Production, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, antsa-55@yandex.ru

Kostrikin Viktor Andreevich — Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher at the Department of Breeding and Seed Production, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology v.kostrikin2015@yandex.ru

Nedorezova Yelena Viktorovna — Cand. Sci. (Tech.), Engineer at the Scientific and Technical Department and Acting Scientific Secretary, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, nedorezova.biotex@internet.ru

Received 05.04.2026.

Approved after review 23.06.2026.

Accepted for publication 10.09.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest