

УДК 581.52+57.042+577.3

ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО В УСЛОВИЯХ ГОРОДА ДОНЕЦКА

В. О. Корниенко¹, В. Н. Калаев²¹ Донецкий государственный университет
283001, Донецк, ул. Университетская, 24² Воронежский государственный университет
394018, Воронеж, Университетская пл., 1

E-mail: kornienkovo@mail.ru, Dr_Huixs@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.

Представлены результаты исследования биоэкологических особенностей (аллометрии, жизнеспособности, морфометрии) дуба черешчатого формы пирамидальная (*Quercus robur* L. var. *pyramidalis*) в условиях антропогенного загрязнения промышленного г. Донецка юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж). Показана более высокая жизнеспособность контрольной группы растений (1 балл, здоровые деревья) по сравнению с экспериментальной (1.5 ± 0.5 балла, здоровые деревья, редко ослабленные), произрастающих на территориях с антропогенным загрязнением. Диаметр стволов деревьев экспериментальной группы в среднем выше на 34 %, чем в контрольных насаждениях, объем ствола и фитомасса различных фракций, произрастающих в условиях антропогенной нагрузки, больше на ~ 50–70 %, чем на контрольной территории. При этом аллометрические зависимости на двух территориях имеют одинаковые закономерности и подчиняются степенной регрессии. Аллометрическое соотношение диаметра к длине ствола ($d : l$) как для контрольной, так и экспериментальной группы имело высокое значение и составляло 0.04–0.05. Деформации стволов не наблюдались в связи с высокой механической устойчивостью. Архитектоника кроны подвергалась трансформации при наличии скелетных ветвей с соотношением диаметра к длине $d : l < 0.01$. В ходе исследований архитектоники кроны выявлены необратимые деформации скелетных ветвей различного порядка (в основном мелких) на двух территориях в равной степени, но при этом разрывов и изменения сомкнутости кроны не наблюдалось, степень аварийности растений была на низком уровне (отсутствие обломов после снятия нагрузок). Деревья дуба черешчатого пирамидальной формы рекомендуется использовать при формировании многолетних насаждений в промышленных городах, так как они сохраняют высокую жизнеспособность, механическую устойчивость и стабильные аллометрические показатели, от которых зависит устойчивость всего растения.

Ключевые слова: урбосистема, дуб черешчатый, состояние и устойчивость растений, фитомасса, архитектура кроны, Донбасс.

DOI: 10.15372/SJFS20240409

ВВЕДЕНИЕ

В условиях загрязнения городских экосистем остро встает проблема создания многолетних насаждений с высоким адаптационным потенциалом к действию антропогенных факторов и уровнем жизнеспособности древесных растений (Бухарина и др., 2007; Поляков, 2009; Корниенко, Калаев, 2018, 2022; Кулакова и др., 2021). При озеленении промышленных городов,

находящихся в степной зоне, в связи с особенностями влияния экологических факторов на радиальный прирост стволов деревьев эта проблема приобретает ещё большее значение (Каплина, Селочник, 2015; Netsvetov et al., 2017, 2018, 2021; Kharchenko et al., 2021; Каплина, 2022). Одним из самых изучаемых видов среди древесных растений, с учетом разработанности темы (например, Институтом лесоведения РАН (Вомперский и др., 2019)), остается дуб черешчатый

(*Quercus robur* L.) (Попова, 2021). Исследования направлены на выявление лесопатологий стволов растений (Крюкова, Царалунга, 2010; Царалунга и др., 2014), изучение физико-механических свойств и строения древесины (Ширнин, 1999; Ширнин, Крюкова, 2015; Gričar et al., 2013; Корниенко и др., 2018), активно ведутся дендрохронологические и дендроклиматические исследования (Prokop et al., 2016; Tumajer et al., 2016; Matveev et al., 2018; Goncharenko et al., 2020; Netsvetov et al., 2018, 2021), изучение цитогенетических характеристик и морфологических показателей семенного потомства (Калаев, Попова, 2014), а также работы в области моделирования откликов фитомассы лесов на изменения температуры (Усольцев, Цепордей, 2020). Многие авторы отмечают высокие декоративные свойства дуба, полезные функции и ценность как породы в целом (Ерофеев и др., 2014; Горбачева и др., 2017; Михин, Михина, 2018; Domínguez-Delmas, 2020). В основном такие работы направлены на изучение раскидистой (обыкновенной) формы дуба черешчатого (в естественных условиях – лесные массивы), и лишь малая часть работ посвящена изучению его декоративной (пирамидальной) формы в условиях городской среды (Филимонова, 2008; Морозова, Иозус, 2015). Многие авторы отмечают комплексную устойчивость дуба черешчатого формы пирамидальная (*Quercus robur* L. var. *pyramidalis*) к абиотическим факторам в условиях сухой степи Нижнего Поволжья (Филимонова, 2008; Крючков, Маттис, 2014; Морозова, Иозус, 2015).

В условиях промышленных городов юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж) оценка биоэкологических особенностей дуба черешчатого формы пирамидальная является актуальной и мало изученной темой. Так, морфология ствола, архитектура кроны и аллометрические зависимости этого растения практически не рассмотрены в работах, посвященных изучению дендрофлоры мегаполисов. Также не рассматривались вопросы оценки механической устойчивости деревьев с пирамидальной формой кроны в контексте экологических исследований. Изучение вышеуказанных параметров и свойств растений позволит оценить их потенциал при использовании в качестве защитных и озеленительных насаждений в условиях степной зоны при антропогенном прессинге.

Целью работы было исследование биоэкологических особенностей дуба черешчатого формы пирамидальная в озеленении промыш-

ленных городов юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж) на примере города Донецка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран дуб черешчатый формы пирамидальная. Деревья выделяются архитектурой кроны – узкопирамидальной (15 деревьев, рис. 1, а), а также встречаются экземпляры с более рыхлой широкопирамидальной формой (17 деревьев, рис. 1, б).

Исследования повреждений ствола проводились с разной частотой в период 2009–2023 гг., остальные замеры (морфометрия ствола и кроны, биомеханические испытания, построение математических моделей) – с 2022 г. (зимний, летний и осенний сезоны) по 2023 г. (зимний, весенний и летний сезон). Скелетные ветви дуба черешчатого формы пирамидальная направлены строго вертикально, часто наблюдаются их необратимые изгибы, связанные с влиянием природно-климатических факторов и необратимой деформацией тканей. Извилистая форма ветвей придает растению высокие декоративные качества (Филимонова, 2008).

Территориями проведения исследований для оценки эколого-биологических особенностей дуба черешчатого формы пирамидальная были выбраны две аллеи:

1 – деревья произрастают вдоль центральной аллеи Южного массива Донецкого ботанического сада (контроль). Длина участка около 200 м (рис. 2).

Аллея была сформирована в 1973 г. трехлетними саженцами (возраст деревьев в настоящее время 53 года), общее количество исследованных деревьев составило 15 экз.;

2 – деревья, произрастающие в условиях антропогенного загрязнения, располагаются на территории, прилегающей к зданию администрации г. Донецка (пересечение центральной ул. Артема и перпендикулярно расположенных пр. Мира и пр. Ватутина) (рис. 3).

Длина участка – около 220 м. Аллея возле здания городского совета сформирована в 1967–1968 гг. (возраст деревьев 58–59 лет), общее число растений – 17 экз.

Антропогенное загрязнение на экспериментальной территории определяли по интенсивности движения автотранспорта, уровню вибрационно-акустического шума, а также загрязнению атмосферного воздуха токсикантами.



Рис. 1. Вариации крон дуба черешчатого формы пирамидальная на исследуемых территориях. а – узкопирамидальная; б – широкопирамидальная.

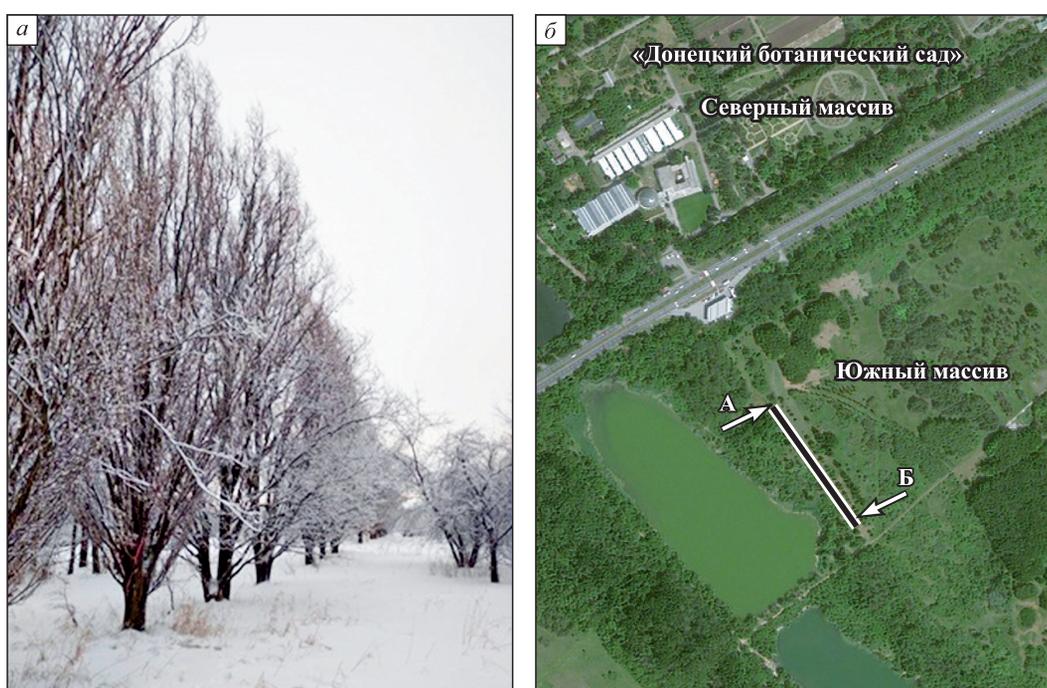


Рис. 2. Аллея деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающих в условиях дендрария Донецкого ботанического сада (контроль).

а – начало аллеи (48°00.712' с. ш.); б – окончание аллеи (37°88.084' в. д.).

Интенсивность движения автотранспорта вдоль исследуемых участков на всех территориях исследования оценивалась по количеству единиц автотранспорта определенного типа, проезжающих мимо точки измерения во всех направлениях за единицу времени (ГОСТ 20444-85,

1985). Уровень звукового давления (дБА) измеряли с помощью цифрового шумомера Venetech GM1351, вибрационные спектры – с помощью портативного осциллоскопа.

Исследования атмосферного воздуха на наличие загрязняющих веществ вдоль автомаги-



Рис. 3. Аллея деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающих в условиях антропогенной нагрузки г. Донецка.

a – начало аллеи (48°01.699' с. ш.); *б* – окончание аллеи (37°80.154' в. д.).

стралей проводили с 2021 по 2022 г. Для забора воздуха и дальнейшего его анализа использовали универсальный газоанализатор ГАНК-4. Анализ содержания в атмосферном воздухе токсикантов проводили согласно руководящему документу РД 52.04.186-89 (Руководство..., 1989). На атомно-абсорбционном спектрофотометре (ААС) исследовали содержание тяжелых металлов в почве по ГОСТ 28168-89 (1989). Пробы почв в месте произрастания деревьев (линейные насаждения) в зоне влияния транспортных магистралей отбирали методом конверта по ГОСТ 174.3.01-83 (1983).

Дендрарий (Южный массив Донецкого ботанического сада) по периметру огражден бетонными конструкциями и лесозащитными насаждениями от автотрассы, которые препятствуют прохождению вибрационно-акустического шума (значения находятся в пределах значений естественного шума в лесу – 45 ± 5 дБА) и токсикантов за пределы ограждения. В почвах и воздушной среде концентрации токсикантов находятся в пределах ПДК и не имеют превышений. В связи с этим территорию можно рассматривать как экологически чистую, или контрольную (Корниенко, Калаев, 2022; Kornienko, Kalaev, 2022).

Территории исследований имеют один тип почв – обыкновенный чернозем мощный средневещелоченный (Поляков, 2009; Корниенко, Калаев, 2021*a*). рН почв на территории Донецкого ботанического сада колеблется от нейтральной (6.98) до слабощелочной (7.61), на территории с антропогенной нагрузкой минимальное

значение рН в течение сезона составляет 6.94, а среднее 7.64 ± 0.39 .

Оценку жизнеспособности контрольных и экспериментальных насаждений дуба черешчатого формы пирамидальная проводили согласно интегральной шкале В. А. Алексева (1989).

Результаты визуального осмотра исследуемых древесных растений фиксировались с помощью фотоаппарата Nikon Coolpix S2600, дальнейшую обработку и анализ изображений проводили в программе AxioVision Rel. 4.8. В результате выполнения работы для изучения площади и размаха кроны, углов отхождения ствола и скелетных ветвей от нормали было обработано свыше 100 электронных фотографий. В программе AxioVision Rel. 4.8. углы измерялись с точностью до 1° . Диаметр ствола измеряли мерной вилкой.

Аллометрическое соотношение диаметра к длине ствола ($d : l$) оценивали согласно патенту на изобретение RU № 2759764 (Корниенко, Калаев, 2021*б*). Так, при значениях $d : l \leq 0.01$ считали, что они подвержены необратимой деформации и механически неустойчивы.

Оценку объема ствола, фитомассы различных фракций деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная и моделирование их динамики проводили с использованием аллометрических зависимостей, установленных Ю. П. Демаковым с соавт. (2015).

Объем ствола (V , м³) определяли по формуле

$$V = a \cdot 10^{-5} \cdot h^b \cdot (d + 1)^2. \quad (1)$$

Надземную фитомассу ($M_{\text{общ}}$, кг) дерева с листовой рассчитывали согласно формуле

$$M_{\text{общ}} = a \cdot 10^{-2} \cdot h^b \cdot (d + 1)^2. \quad (2)$$

Фитомассу ветвей ($M_{\text{ветвей}}$, кг) оценивали по формуле

$$M_{\text{ветвей}} = a \cdot 10^{-3} \cdot h^b \cdot (d + 1)^2. \quad (3)$$

Фитомассу ассимиляционного аппарата дерева ($M_{\text{листьев}}$, кг) определяли по уравнению

$$M_{\text{листьев}} = a \cdot 10^{-3} \cdot (d + 1)^b. \quad (4)$$

Фитомасса корней дерева ($M_{\text{корней}}$, кг) теоретически была оценена согласно формуле

$$M_{\text{корней}} = a \cdot 10^{-3} \cdot (d + 1)^b, \quad (5)$$

для всех формул a и b – параметры из регрессионных уравнений (Демаков и др., 2015), h – высота дерева, м; d – диаметр ствола на высоте 1.3 м, см.

Расчет параметров механической устойчивости (RRB , EI , P_{cr} и m_{cr}) проводили по следующим формулам:

RRB – относительное сопротивление изгибу (Niklas, Spatz, 2010):

$$RRB = \frac{r^2 MOE}{4\rho}, \quad (6)$$

где r – радиус основания ствола; MOE – модуль упругости; ρ – плотность древесины;

EI – сопротивление древесного ствола растения или его скелетных ветвей изгибу при действии динамических или статических нагрузок, отражает способность растений выдерживать нагрузки и определяется произведением модуля упругости и второго момента сечения:

$$EI = \frac{\pi r^4}{4}, \quad (7)$$

$$P_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 MOE I}{2l^2}, \quad (8)$$

$$m_{\text{cr}} = \frac{P_{\text{cr}}}{g}, \quad (9)$$

где P_{cr} – предельно допустимая нагрузка; m_{cr} – критическая масса; I – момент инерции сечения; l – длина ствола; g – ускорение силы тяжести.

Параметры отражают конкретные значения массы (кг или Н), при действии которой ствол древесного растения или его скелетные ветви начинают деформироваться или обламываться от ветровых или гравитационных нагрузок (Niklas, 2016).

Для статистической обработки данных использовали программу Excel 2010 (Microsoft Corp.). При построении графиков выводили уравнения регрессии и оценивали достоверность аппроксимации (R^2). Достоверность различий средних значений в опыте и контроле (объем ствола, фитомасса различных фракций, морфометрические параметры стволов, а также параметры механической устойчивости для контрольных и экспериментальных групп) деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, определяли с использованием t -критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты антропогенного загрязнения территории исследований. Анализ интенсивности транспортного потока на исследуемой территории Донецка оценивали в начале, середине и конце рабочего дня. На основании расчетов составлена усредненная таблица антропогенной нагруженности территории исследования (табл. 1).

Установили, что преобладающим видом транспорта является пассажирский легковой автотранспорт, преимущественно автомобили иностранного производства (60 %). На долю легковых отечественных автомобилей приходится 23 %, а на внедорожники – 15.5 %.

Максимумы значений уровня звукового давления располагаются в диапазоне 80–110 дБА, со спектром частот на максимуме энергии 400–800 Гц. Среднее значение вибрационно-акустического загрязнения вблизи автомагистралей составляло 80 ± 2 дБ (табл. 2).

На экспериментальной территории выявлены превышения концентраций сероводорода (0.025 ± 0.005), концентрации угарного газа были у верхней границы ПДК (4.3 ± 0.5), также обнаружено содержание аммиака (0.11 ± 0.1), в почвах со стороны автомагистралей – только превышения по содержанию меди (202.3 ± 217.6), при удалении от автомагистрали (ул. Артема, пр. Ватутина, пр. Мира) в сторону аллеи значения токсикантов находились в пределах ПДК.

Жизнеспособность деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная. При сравнении жизнеспособности контрольных древостоев дуба черешчатого формы пирамидальная и произрастающих в условиях городской среды, выяснили, что в контроле практически отсутствуют механические повреждения ствола (зафиксировано только наличие мелких заросших

Таблица 1. Интенсивность движения автотранспорта на территории исследований г. Донецка, ед./ч

Территория исследования	Вид автотранспорта					Сумма	
	грузовые		пассажирские легковые				муниципальный
	тяжелые	легкие	а	б	в		
Ул. Артёма между пр. Ватутина и пр. Мира	< 10	< 3	678	264	144	12 (2-й маршрут)	1111
Пр. Мира	< 5	< 1	577	240	207	4 (8-й маршрут)	1034
Пр. Ватутина	< 3	< 1	426	138	84	–	652
В с е г о по территории...	~ 18	~ 5	1681	642	435	16	2797

Примечание. а – иномарки легковые; б – легковые российские ВАЗ, Lanos и т. д.; в – иномарка внедорожник.

Таблица 2. Средние значения шумового загрязнения на территории исследований г. Донецка, дБ

Территория исследования	Расстояние от автомагистрали, м			
	0.5	2	8	15
Ул. Артема между пр. Ватутина и пр. Мира	80 ± 2	77 ± 2	68 ± 2	65 ± 2
Пр. Мира	79 ± 1	75 ± 1	70 ± 1	66 ± 1
Пр. Ватутина	81 ± 1	72 ± 3	68 ± 2	64 ± 3

морозобоин). На территории с антропогенной нагрузкой для деревьев характерны значительные механические повреждения ствольной части: в редких случаях – отслоение коры (рис. 4, а, б) и большое количество морозобойных трещин различного характера (рис. 4, в, г, табл. 3).

Морозобойные трещины являются специфическими патологическими признаками для видов рода дуб (*Quercus* L.) (Царалунга и др., 2014). В условиях антропогенной нагрузки г. Донецка морозобоины выявлены у большинства выборки (73 %) и варьировали по длине трещины и степени зарастания. Длина морозобоин в среднем составляла 30 ± 10 см (часто несколько на одном стволе), но были и очень глубокие, длиной 1.0–2.2 м (рис. 4, в). При детальном анализе морозобоин (наблюдения велись с зимнего сезона 2009/10 г.) установлено, что к настоящему вре-

мени (2021–2023 гг.) они полностью затянулись, и деревья находятся в стабильном состоянии. В условиях антропогенного загрязнения количество поврежденных стволов от морозобоин достоверно выше, чем в контроле (табл. 3).

Зигзагообразность скелетных ветвей дуба черешчатого формы пирамидальная была отмечена в среднем у 88 % исследованных растений как в опыте, так и в контроле. Раздвоение ствола или многоствольность также были отмечены у всех исследуемых растений. Для дуба черешчатого с раскидистой кроной (обыкновенного) В. В. Царалунга с соавт. (2014) установили, что при увеличении числа стволов уменьшается механическая устойчивость целого дерева к действию экологических факторов в виде ветровых нагрузок, осадков, а также собственной биомассы дерева, действующей на ствол растения.

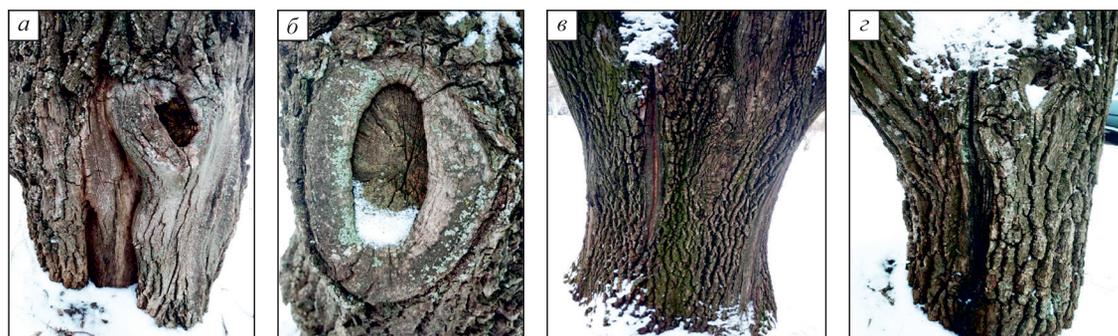


Рис. 4. Механические повреждения стволов дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающего в условиях г. Донецка.

а, б – отслоения коры; в, г – морозобойные трещины.

Таблица 3. Аллометрические и морфометрические показатели стволов деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная в условиях антропогенной нагрузки и в контроле (дендрарий ботанического сада)

Параметры	Эксперимент	Контроль
Высота развилки, м	1.6 ± 0.7**	0.5 ± 0.2
Площадь кроны, м ²	42.93 ± 23.3*	23.7 ± 5.0
Угол отхождения скелетных ветвей первого порядка, град.	25.0 ± 7.9**	31.6 ± 9.7
Размах кроны, м	6.4 ± 2.2**	4.7 ± 1.0
Морозобоины и др. механические повреждения стволов, %	73 %**	27 %
Жизнеспособность, балл	1 (41 %)* 2 (59 %)	1 (100 %)
Диаметр на высоте 1.3 м, см	51.5 ± 14.9**	33.9 ± 4.5

* Различия с контролем достоверны, $p < 0.05$.

** То же, $p < 0.01$.

Однако для дуба черешчатого формы пирамидальная также необходимо учитывать и снижение центра масс, что увеличивает механическую устойчивость дерева (Корниенко, Калаев, 2018). Для экспериментальной территории высота развилки составляла в среднем 1.6 ± 0.7 м, а на высоте 0.3–0.5 м от земли, для нескольких растений отмечено многостволье с 7–10 стволами, для растения контрольной группы высота развилки находилась ниже (в основном на высоте 20–50 см) (табл. 3).

С учетом всех патологий, по интегральной шкале В. А. Алексеева (1989), жизнеспособность контрольной группы растений оценена в 1 балл (100 % деревьев) – это в основном здоровые деревья, которые не имеют критических повреждений кроны и ствола, густота обычна для этого вида растений в условиях города, сухобочинность и суховершинность кроны не наблюдаются. Для экспериментальной группы растений жизнеспособность составляла в среднем 1.5 ± 0.5 балла (различия с контролем достоверны ($p < 0.05$)). Снижение жизнеспособности для некоторых экземпляров помимо механических повреждений ствола также было связано с трансформацией формы кроны в связи с чрезмерным удлинением некоторых скелетных ветвей, снижением густоты и наличием сухих ветвей в нижней части кроны.

Аллометрические и морфометрические исследования. Данные по аллометрическим и морфометрическим показателям деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающих на опытных и контрольных территориях, представлены в табл. 3.

В условиях антропогенной нагрузки г. Донецка морфометрические параметры стволов деревьев имеют в среднем диаметра ствола

выше на 34 %, чем в контрольных насаждениях (различия достоверны ($p < 0.01$)), для некоторых экземпляров он достигал 85–114 см. В ходе проведения вычислений оценили аллометрические зависимости объема ствола и фитомассы различных фракций деревьев контрольных и экспериментальных насаждений. Установлено, что объем ствола (с учетом многостволья) был достоверно выше в среднем на 69 % у деревьев, произрастающих на опытной территории, регрессионная зависимость имеет степенной вид и высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.99$) (рис. 5).

Для контрольных насаждений в среднем этот параметр составлял 0.5 ± 0.2 м³. Расчеты по моделированию фитомассы различных фракций деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающих в дендрарии и в условиях антропогенной нагрузки г. Донецка, показали, что фитомасса ветвей (+68 %), ассимиляционного аппарата (+56 %), корней (+60 %) и фито-

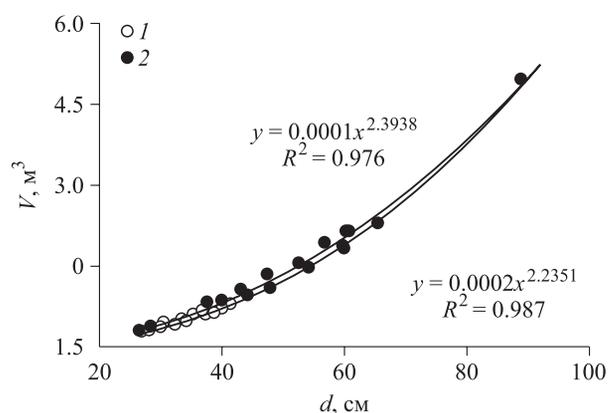


Рис. 5. Зависимость объема ствола (V) от диаметра на высоте 1.3 м (d) для дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающего в условиях дендрария (1) и городской территории (2).

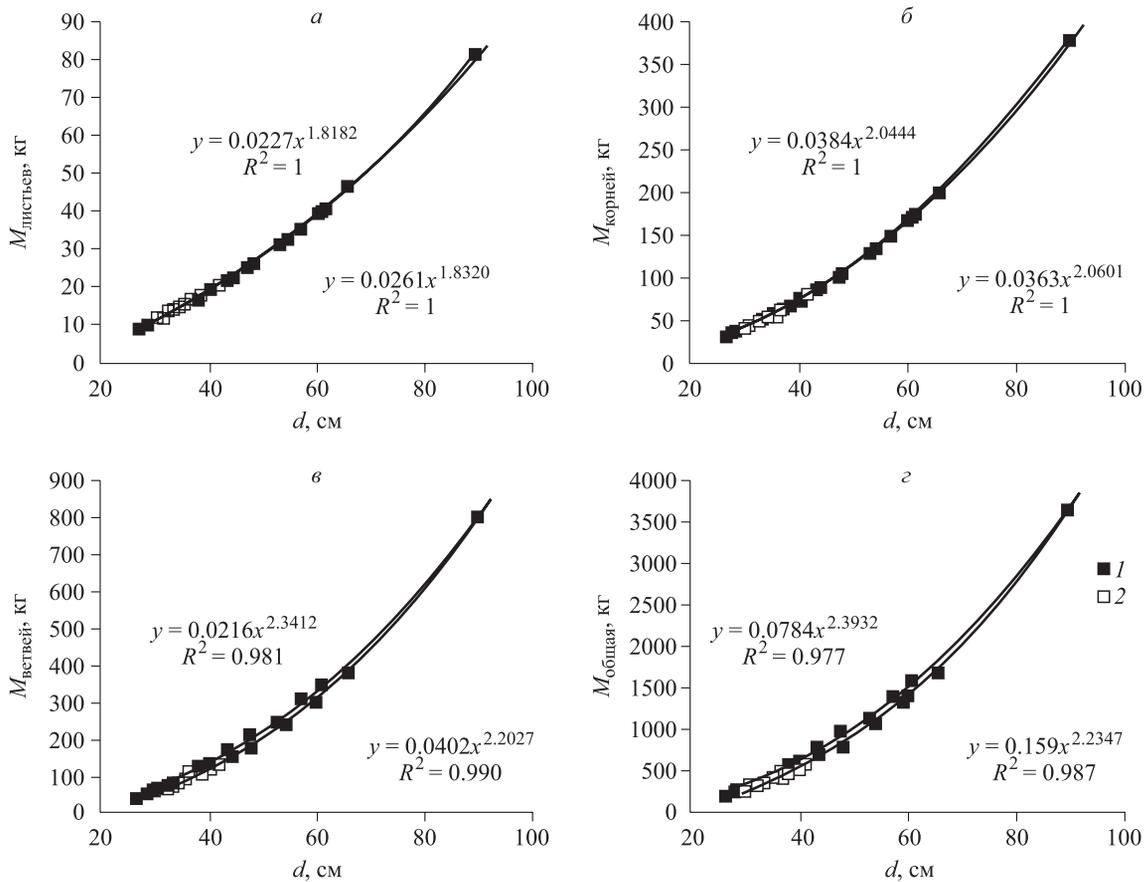


Рис. 6. Зависимость фитомассы различных фракций от диаметра ствола (на высоте 1.3 м) деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающего на контрольной (1) и экспериментальной (2) территориях.

Фитомасса: а – листьев, б – корней дерева, в – скелетных ветвей кроны, з – общая дерева.

масса надземной части в целом (+70 %) для экспериментальных насаждений выше, чем контрольных (рис. 6).

Несмотря на различия в средних значениях, аллометрические зависимости на двух территориях имеют одинаковую тенденцию (степенной вид регрессии) к нарастанию объема ствола и фитомассы различных фракций деревьев от размера растения.

Аллометрическое соотношение диаметра к длине ствола ($d : l$) как для контрольной, так и экспериментальной группы имело высокое значение и составляло 0.04–0.05 (рис. 7).

Деформации стволов не наблюдались. Показатели относительного сопротивления изгибу (RRB) для стволов имели степенную зависимость (рис. 7, а).

Для деревьев, произрастающих в условиях антропогенной нагрузки, жесткость ствола на изгиб в среднем составляла $6.5 \cdot 10^7$ кг, что на порядок выше, чем в условиях контроля ($EI = 4.6 \cdot 10^6$) (рис. 7, б). При этом критическая масса и нагрузка, которую способны выдержать

деревья при действии экологических факторов, для таких растений выше на 85 % (рис. 7, в, з). Степенные зависимости отличаются углом наклона, для деревьев произрастающих на территории с антропогенной нагрузкой, характерно большее нарастание критической массы от аллометрического соотношения $d : l$ (значение показателя степени 4.62 к 4.17).

При $d : l = 0.04$ значения критической массы на контрольных территориях ниже на 15 % и при дальнейшем нарастании аллометрического показателя различия всё более значительны.

Таким образом, можно сделать вывод об определенной адаптивной стратегии деревьев дуба черешчатого формы пирамидальная в ответ на антропогенный прессинг, связанной с увеличением объема ствола и фитомассы различных фракций, а также о биомеханической устойчивости организма к действию природно-климатических факторов среды (динамические и статические нагрузки).

На территории с антропогенной нагрузкой площадь кроны всех исследованных деревьев

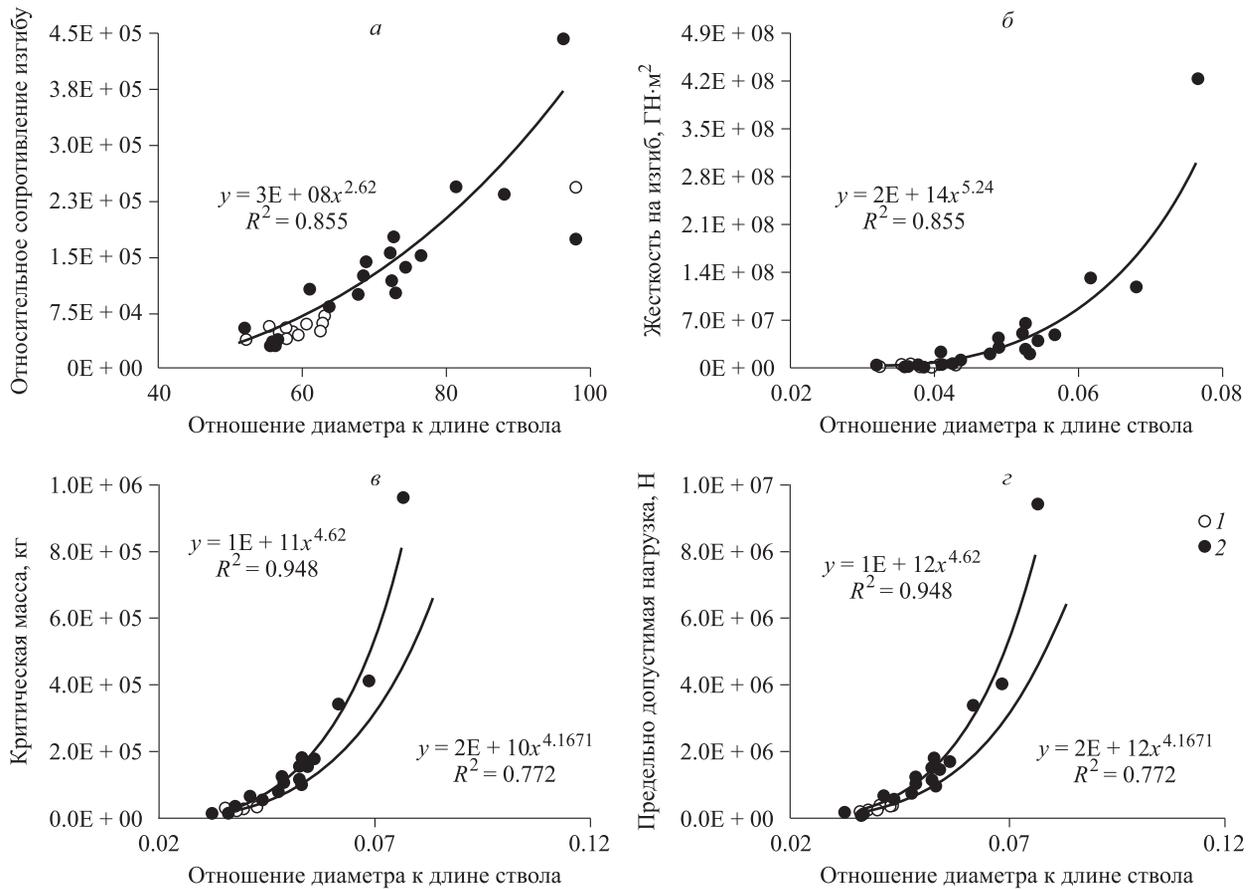


Рис. 7. Зависимость параметров механической устойчивости от отношения диаметра к длине стволов дуба черешчатого формы пирамидальная, произрастающего на контрольной (1) и экспериментальной (2) территориях. а – относительное сопротивление изгибу; б – жесткость на изгиб; в – критическая масса; г – предельно допустимая нагрузка.

в среднем составляла $42.93 \pm 23.3 \text{ м}^2$ и была больше ($p < 0.05$), чем на контрольной территории. При этом угол отхождения скелетных ветвей первого порядка для дуба черешчатого формы пирамидальная в среднем составляет $25.0 \pm 8.0^\circ$ в условиях антропогенной нагрузки и $31.6 \pm 10^\circ$ на территории дендрария (табл. 3).

Установлено, что при соотношении диаметра скелетных ветвей к их длине ($d : l$) $\gg 0.01$ рост имеет строго вертикальное направление, а значения критической массы много больше реально действующей в условиях природно-климатических факторов (ветер, осадки, оледенение). Даже порывы ветра, не наносят ущерб растениям, имеющим соотношение $d : l \sim 0.03$. Для деревьев, произрастающих на исследованных территориях, наблюдались необратимые изгибы скелетных ветвей первого и второго порядков, которые чрезмерно удлинились и отношение $d : l$ которых приближалось к критическому ($\ll 0.01$) (согласно патенту № 2759764). Рассчитанные значения критической массы скелетных ветвей, подвергшихся необратимой де-

формации, составляли в среднем $19.9 \pm 2.2 \text{ кг}$, а критической высоты (H_{cr}) – $7.63 \pm 1.98 \text{ м}$, что соответствует реально полученным данным замеров на двух территориях. В ходе исследований архитектоники кроны хотя и были выявлены необратимые деформации скелетных ветвей различного порядка (в основном мелких) на двух территориях в равной степени, но при этом разрывов и изменения сомкнутости кроны не наблюдалось, степень аварийности растений была на низком уровне (отсутствие обломов после снятия нагрузок).

Проведя анализ всех полученных данных можно сделать вывод о том, что, сохраняя высокую жизнеспособность, механическую устойчивость и общие аллометрические соотношения, от которых зависит устойчивость всего растения, деревья дуба черешчатого формы пирамидальная способны формировать долгосрочные насаждения в промышленных городах. Пирамидальная форма кроны растений будет отличным решением при благоустройстве узких городских улиц или автомагистралей с ограниченным про-

странством тротуарной части. Для предотвращения изменения архитектоники кроны (выпадения скелетных ветвей вследствие необратимой деформации) при действии экологических факторов следует применять ускоренный метод оценки механической устойчивости по морфометрическому соотношению $d : l$ скелетных ветвей дуба черешчатого формы пирамидальная в городской среде (Корниенко, Калаев, 2021б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований жизнеспособность дуба черешчатого формы пирамидальная контрольной группы растений получила оценку 1 балл (здоровые деревья), а экспериментальной – 1.5 ± 0.5 балла (здоровые деревья, редко ослабленные).

Установлено, что морфометрические параметры стволов экспериментальной группы имеют в среднем диаметр на 34 % выше, чем контрольные насаждения.

Объем ствола и фитомасса различных фракций деревьев, произрастающих в условиях антропогенной нагрузки больше на ~ 50–70 %, чем для контрольной территории. При этом аллометрические зависимости на двух территориях имеют одинаковые закономерности и подчиняются степенной регрессии.

Аллометрическое соотношение диаметра ствола к длине ($d : l$) как для контрольной, так и экспериментальной группы имело высокое значение – 0.04–0.05. Деформации стволов не наблюдались в связи с высокими показателями механической устойчивости. Архитектоника кроны подвергалась трансформации при наличии скелетных ветвей с соотношением диаметра к длине $d : l < 0.01$.

Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно трансформированных экосистем Донбасса» № FRRE-2024-0018, Рег. НИОКТР № 1023110700153-4-1.6.19; 1.6.11; 1.6.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
- Бухарина И. Л., Поварнищина Т. М., Ведерников К. Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: Ижевск. гос. с.-х. акад., 2007. 216 с.
- Вомперский С. Э., Гульбе А. Я., Сирин А. А., Уткина И. А. Итоги и перспективы исследований: к 75-летию Института лесоведения РАН // Лесоведение. 2019. № 6. С. 467–487.
- Горбачева Г. А., Санаев В. Г., Белковский С. Ю., Пастори З. Изменение молекулярно-топологического строения древесины дуба при проявлении эффекта памяти формы // Лесн. вестн. 2017. Т. 21. № 4. С. 36–41.
- ГОСТ 174.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинофрм, 1983. 4 с.
- ГОСТ 20444-85. Государственный стандарт Союза ССР. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики. М.: Гос. комитет СССР по делам строительства, 1985. 21 с.
- ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинофрм, 1989. 7 с.
- Демаков Ю. П., Пуряев А. С., Черных В. Л., Черных Л. В. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экол. Природопольз. 2015. № 2 (26). С. 19–36.
- Ерофеев В. Т., Старцев О. В., Антошкин В. Д., Гудожников С. С., Самолькина Е. Г., Болдина И. В., Махоньков А. Ю. Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности // Фундамент. иссл. 2014. № 9–12. С. 2630–2638.
- Калаев В. Н., Попова А. А. Цитогенетический полиморфизм проростков семян деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на территориях с разным уровнем антропогенного загрязнения // Пробл. рег. экол. 2014. № 2. С. 176–190.
- Каплина Н. Ф. Цикличность радиального прироста ствола и жизненное состояние дуба черешчатого в нагорной и пойменной дубравах южной лесостепи // Лесоведение. 2022. № 1. С. 21–33.
- Каплина Н. Ф., Селочник Н. Н. Текущее и долговременное состояние дуба черешчатого в трех контрастных типах леса южной лесостепи // Лесоведение. 2015. № 3. С. 191–201.
- Корниенко В. О., Калаев В. Н. Механическая устойчивость древесных пород и рекомендации по предотвращению их аварийности в городских насаждениях. Воронеж: Роза ветров, 2018. 92 с.
- Корниенко В. О., Калаев В. Н. Эколого-биологические особенности и механическая устойчивость древесных растений, используемых в озеленении города Донска. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2021а. 109 с.
- Корниенко В. О., Калаев В. Н. Способ оценки механической устойчивости дуба черешчатого в городской среде. Патент РФ на изобретение RU № 2759764. М.: Роспатент, 2021б.
- Корниенко В. О., Калаев В. Н. Влияние природно-климатических факторов на механическую устойчивость и аварийность деревьев березы повислой в г. Донецке // Лесоведение. 2022. № 3. С. 321–334.
- Корниенко В. О., Калаев В. Н., Елизаров А. О. Влияние температуры на биомеханические свойства древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта // Сиб. лесн. журн. 2018. № 6. С. 91–102.
- Крюкова А. А., Царалунга В. В. Патологические формы ствола у дуба черешчатого в дубравах Воронежской области // ИВУЗ. Лесн. журн. 2010. № 4. С. 10–13.

- Крючков С. Н., Маттис Г. Я. Лесоразведение в засушливых условиях. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014. 300 с.
- Кулакова Н. Ю., Колесников А. В., Курганова И. Н., Шуйская Е. В., Миронова А. В., Скоробогатова Д. М. Влияние автотранспортного загрязнения на биохимические и морфологические показатели состояния деревьев дуба черешчатого // Лесоведение. 2021. № 4. С. 393–405.
- Михин В. И., Михина Е. А. Формирование защитных насаждений из дуба черешчатого в Центральном Черноземье России // Лесотех. журн. 2018. № 4. С. 109–117.
- Морозова Е. В., Иозус А. П. Основные результаты селекции пирамидальных форм дуба черешчатого в условиях сухой степи нижнего Поволжья // Совр. пробл. науки и образов. 2015. № 2 (2). С. 1–6.
- Поляков А. К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды. Донецк: Ноулидж, 2009. 268 с.
- Попова А. А. Биотическая изменчивость и селекция дуба черешчатого в центральной лесостепи: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.01. Воронеж: ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова, 2021. 40 с.
- Руководство по контролю загрязнения атмосферы: руководящий документ РД 52.04.186-89. М.: Минздрав СССР, 1989. С. 1–74.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С. Климатические градиенты фитомассы насаждений *Quercus* spp. на территории Евразии // Сиб. лесн. журн. 2020. № 6. С. 16–29.
- Филимонова Л. В. Биоэкологическое обоснование применения пирамидальной формы дуба черешчатого в благоустройстве и озеленении городов // Акт. пробл. лесн. компл. 2008. № 21 (3). С. 169–172.
- Царалунга В. В., Фурменкова Е. С., Крюкова А. А. Внешние признаки патологии дуба черешчатого: моногр. Воронеж: ВГЛТА, 2014. 215 с.
- Ширнин В. К. Селекция на качество древесины (на примере дуба черешчатого и других пород в ЦЧО): автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.01. СПб.: СПбЛТА, 1999. 48 с.
- Ширнин В. К., Крюкова С. А. Моделирование идеального сорта дуба черешчатого с высоким качеством древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сб. науч. тр. Воронеж, 2015. № 9. Ч. 3 (20-3). С. 396–400.
- Domínguez-Delmas M. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century // Dendrochronologia. 2020. V. 62. Article 125731.
- Goncharenko I., Semenishchenkov Y., Tsakalos J. L., Mucina L. Thermophilous oak forests of the steppe and forest-steppe zones of Ukraine and Western Russia // Biologia. 2020. V. 75. Iss. 1. P. 337–353.
- Gričar J., Luis M. de, Hafner P., Levanič T. Anatomical characteristics and hydrologic signals in tree-rings of oaks (*Quercus robur* L.) // Trees. 2013. V. 27. Iss. 6. P. 1669–1680.
- Kharchenko N. N., Kalaev V. N., Kornienko V. O. Mechanical stability of pedunculate oak at the ecological boundary of the species distribution in the steppe // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. Int. Sci.-Pract. Conf. «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions» (Forestry-2021). 2021. V. 875. Article 012049.
- Kornienko V. O., Kalaev V. N. Impact of natural climate factors on mechanical stability and failure rate in silver birch trees in the city of Donetsk // Contemp. Probl. Ecol. 2022. V. 15. Iss. 7. P. 806–816 (Original Rus. text © 2022, V. O. Kornienko, V. N. Kalaev publ. in Lesovedenie. 2022. N. 3. P. 321–334).
- Matveev S., Milenin A., Timashchuk D. The effects of limiting climate factors on the increment of native tree species (*Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L.) of the Voronezh Region // J. For. Sci. 2018. V. 64. N. 10. P. 427–434.
- Netsvetov M., Prokopuk Y., Didukh Y., Romenskiy M. Climatic sensitivity of *Quercus robur* L. in floodplain near Kyiv under river regulation // Dendrobiology. 2018. V. 79. P. 20–33.
- Netsvetov M., Prokopuk Yu., Ivanko I., Kotovych O., Romenskiy M. *Quercus robur* survival at the rear edge in steppe: Dendrochronological evidence // Dendrochronologia. 2021. V. 67. Article 125843. 8 p.
- Netsvetov M., Sergeev M., Nikulina V., Kornienko V., Prokopuk Y. The climate to growth relationships of pedunculate oak in steppe // Dendrochronologia. 2017. V. 44. P. 31–38.
- Niklas K. J. Tree biomechanics with special reference to tropical trees // Tropical tree physiology. Adaptations and responses in a changing environment. Springer Int. Publ., Switzerland, 2016. P. 413–435.
- Niklas K. J., Spatz H.-C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density // Amer. J. Bot. 2010. V. 97. N. 10. P. 1587–1594.
- Prokop O., Kolař T., Büntgen U., Kyncl J., Kyncl T., Bošela M., Choma M., Barta P., Rybníček M. On the palaeoclimatic potential of a millennium-long oak ring width chronology from Slovakia // Dendrochronologia. 2016. N. 40. P. 93–101.
- Tumajer J., Treml V. Response of floodplain pedunculate oak (*Quercus robur* L.) tree-ring width and vessel anatomy to climatic trends and extreme hydroclimatic events // For. Ecol. Manag. 2016. V. 379. P. 185–194.

VIABILITY OF PEDUNCULATE OAK IN THE CONDITIONS OF THE CITY OF DONETSK

V. O. Kornienko¹, V. N. Kalaev²

¹ Donetsk State University
Universitetskaya str., 24, Donetsk, 283001, Russian Federation

² Voronezh State University
Universitetskaya ploshchad', 1, Voronezh, 394018 Russian Federation

E-mail: kornienkovo@mail.ru, Dr_Huixs@mail.ru

Bioecological characteristics (allometry, viability, morphometry) of the pyramidal shape of pedunculate oak (*Quercus robur* L. var. *pyramidalis*) under conditions of anthropogenic pollution of the city of Donetsk in the south of the East European Plain (Donetsk Ridge) were studied. The higher viability of control group of trees (1 point, healthy trees) compared with the experimental group (1.5 ± 0.5 points, healthy trees, rarely weakened) growing in anthropogenically polluted areas. The diameter of the trunks of the experimental group is on average 34 % higher than the diameter in control pedunculate oak stands. The volume of the stem and phytomass of various fractions of pyramidal pedunculate oak trees growing under conditions of anthropogenic load are ~ 50–70 % greater than for the control area. Moreover, the allometric dependencies in the two territories have the same patterns and are subject to power-law regression. The allometric ratio of the diameter to the length of the trunk ($d : l$) for both the control and experimental groups had a high value and amounted to 0.04–0.05. Deformations of the stems were not observed due to the high mechanical stability. The crown architecture underwent transformation in the presence of skeletal branches with a diameter to length ratio $d : l < 0.01$. In the course of studies of crown architectonics, irreversible deformations of skeletal branches of various orders (mostly small ones) were revealed in two territories equally, but no breaks or changes in crown closure were observed, the degree of plant accidents was at a low level (no breakages after removal of loads). Pedunculate oak trees are recommended for use in the formation of long-term plantings in industrial cities, because they retain high viability, mechanical stability and stable allometric indexes on which the stability of the entire plant depends.

Keywords: urban system, pedunculate oak, plant viability and resistance, phytomass, crown architectonics, Donbass.

How to cite: Kornienko V. O., Kalaev V. N. Viability of pedunculate oak in the conditions of the city of Donetsk // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 4. P. 95–106 (in Russian with English abstract and references).