

УДК 581.5: 539.32

МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТАРОВОЗРАСТНЫХ ДЕРЕВЬЕВ *QUERCUS ROBUR* L. В УСЛОВИЯХ ГОРОДА ДОНЕЦКА

Корниенко В. О.¹, Калаев В. Н.², Харченко Н. Н.³

¹ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, ДНР

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

E-mail: kornienkovo@mail.ru

Статья посвящена механической устойчивости старовозрастных деревьев дуба черешчатого, произрастающих на экологической границе распространения вида в степи. Деревья изученного вида, произрастающие в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж), могут достигать возраста 200 лет, сохраняя при этом жизнеспособность (6 баллов) и высокую механическую устойчивость ($m_{cr}=10^5$ кг, $EI=9,8 \cdot 10^7$ Н·м²) даже при действии неблагоприятных метеорологических факторов. Установлена тесная связь между морфометрическим параметром отношения диаметра ствола дерева, к его высоте от параметров жесткости на изгиб ствола, критической массы и относительного сопротивления изгибу. Полученный результат статистического анализа можно использовать при мониторинге дубрав или одиночных насаждений *Quercus robur* L. с целью выявления растений с низкой механической устойчивостью по показателю отношения диаметра к длине ствола/скелетных ветвей, как морфометрического маркера устойчивости дерева.

Ключевые слова: *Quercus robur* L., механическая устойчивость, степная зона, критическая масса, морфометрический маркер устойчивости, относительное сопротивление изгибу, модуль упругости, биомеханика

ВВЕДЕНИЕ

В границах города Донецка, крупного промышленного центра Восточной Европы, существует уникальный природный лесной массив, являющийся остатком древнего леса, входящего в сеть байрачных лесов бассейна реки Кальмиус. Согласно картографическому материалу (общие топографические планы (1700-е года), карты Теодора Фридриха фон Шуберта (1800-е года)), Путиловский лес (48°03'53" северной широты, 37°47' 34" восточной долготы) существовал и эксплуатировался для заготовки древесины задолго до основания города Донецка (1869 год). С началом индустриализации регион был в основном обезлесен из-за спроса на древесину для строительства и производства древесного угля (Рис. 1). Наличие лесников до революции 1917 года и частичное превращение леса в парк перед Второй мировой войной позволили сохранить Путиловский лес в советский период.

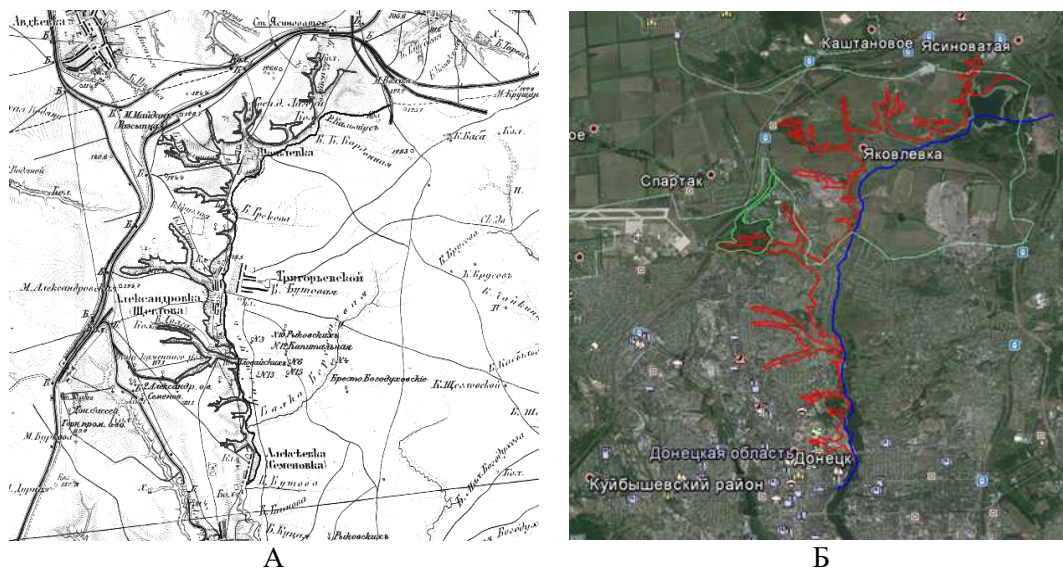


Рис. 1. Путиловский лес на картах Шуберта (А) и на современной карте города Донецка (Б): красной линией обозначены зеленые коридоры, которые существовали в 1878 году; для привязки современной карты и карты Шуберта, использовали программы OziExplorer V 3.95.6d и Google Earth V 7.1.5.

На момент сбора данных по морфологии и аллометрии дуба черешчатого (2013–2014 год) лес занимал около 80 га, включая овраги с ручьями, впадающими в реку Кальмиус [1]. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) – один из самых распространенных и долгоживущих видов деревьев в европейских умеренных лесах, в том числе и городе Донецке. Ареал естественного произрастания этого вида охватывает большую часть Европы [2]. Дуб черешчатый играет ключевую роль в структуре и функционировании лесных экосистем [3–5]. В Путиловском лесу он является одним из доминирующих видов и находится на экологической границе распространения вида в степи.

Дубам, отобраным из остатков старовозрастного леса в Донецке, как правило, от 150 до 250 лет [1]. Растут они, как на склонах оврагов, так и на их вершинах. Средний возраст деревьев произрастающих на склонах составляет 143 ± 31 года, а на вершинах 183 ± 35 года [1]. Средние значения отношения возраста к диаметру (лет/см) на склонах ($1,828 \pm 0,336$ лет/см) и на вершинах ($2,735 \pm 0,394$ лет/см) имели достоверные отличия ($P < 0,05$).

По мере роста, взросления дерева, у него изменяются геометрические и морфологические параметры [6]. Механическая устойчивость, которая определяется коэффициентом жесткости, находится в связи с диаметром (d^4) и с длиной (l^2). Поэтому отношение d/l может быть использовано как морфологический маркер механической устойчивости дерева или его скелетных ветвей. Характер онтогенетических изменений d (диаметра) и l (длины), обуславливает увеличение механической устойчивости старовозрастных деревьев [6]. Однако существуют процессы, приводящие к снижению физико-механических свойств древесины – это

циклические температурные изменения [7, 8], ослабление прочности тканей, в результате произрастания деревьев на загрязненных территориях, разрушение тканей грибами и т. д. По нашим исследованиям жизнеспособность всех исследованных старовозрастных деревьев дуба черешчатого в среднем была оценена по шкале Л. С. Савельевой (1975) 6-ю баллами (хорошее состояние), поэтому вышеописанные процессы не будут вносить вклад при оценке механической устойчивости насаждений.

Цель работы: оценить механическую устойчивость старовозрастных деревьев дуба черешчатого в условиях города Донецка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Механическую устойчивость древесных растений определяли по следующим параметрам:

а) Сопротивление древесного ствола растения или его скелетных ветвей изгибу, при действии динамических или статических нагрузок. Параметр отражает способность растений выдерживать нагрузки и определяется произведением модуля упругости ($MOE = \frac{64 C l^3}{3 \pi d^4}$) и второго момента сечения ($I = \frac{\pi r^4}{4}$, r – радиус) ствола [9, 10].

$$\text{Сопротивление изгибу} = EI \quad (1),$$

б) Относительное сопротивление изгибу [11]:

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

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

в) Критическая масса (m_{cr}) и предельно допустимая нагрузка (P_{cr}). Параметры отражают конкретные значения массы (кг или Н), при действии которой ствол древесного растения или его скелетные ветви начинают деформироваться или обламываться при действии ветровых или гравитационных нагрузках [11].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 MOE I}{2l^2} \quad (3),$$

$$m_{cr} = \frac{P_{cr}}{g} \quad (4),$$

где I — момент инерции сечения, l — длина ствола, g — ускорение силы тяжести.

Для статистической обработки данных использовали программы «Statistica 8» (StatSoft Inc.) и «Excel 2010» (Microsoft Corporation). Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием t-критерия Стьюдента. Для описания зависимостей использовали методы регрессионного анализа. Для выявления тесноты связи между параметрами механической устойчивости и d/l использовали коэффициент корреляции Пирсона (r).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным полученным в ходе полевых исследований мы оценили механическую устойчивость старовозрастных деревьев *Quercus robur* L. Путиловской байрачной дубравы. Установлено, что значение отношения диаметра ствола к его высоте d/l для всех изученных экземпляров составляло в среднем $0,05 \pm 0,01$. С помощью регрессионного анализа установлена достоверная связь между d/l и критической нагрузкой, и массой ($R^2 > 0,99$), которую способно выдержать дерево при действии сезонных изменений температуры окружающей среды (Рис. 2).

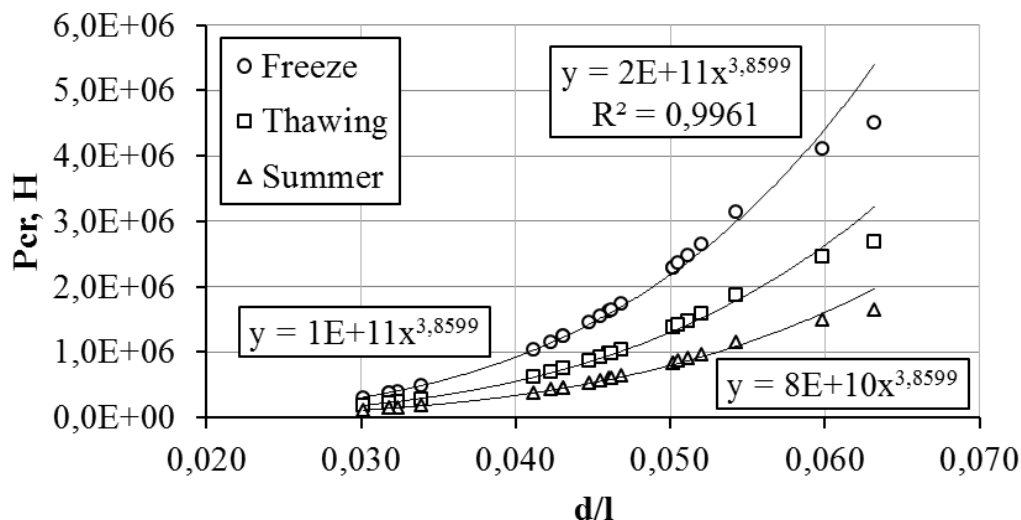


Рис. 2. Зависимость критической нагрузки от отношения d/l как морфометрического маркера механической устойчивости

Так в зимний сезон, при отрицательных температурах воздуха, значения P_{cr} и m_{cr} для растений возрастом свыше 100 лет, имеют высокие показатели (10^5 кг), которые не достижимы даже при действии ветровых нагрузок характерных для региона (в среднем ожидается снижение m_{cr} на $\sim 20\%$ [12]), а также снежных и ледяных бурь (Рис. 3).

Относительное сопротивление на изгиб RRB прямо зависит от модуля упругости (МОЕ). Установлено, что с увеличением толщины ствола RRB растет в степенной зависимости ($R^2=0,98$), поэтому перепады температур не должны сказываться на устойчивости старовозрастных деревьев, которые характеризуются достаточным отношением диаметра ствола к высоте и запасом прочности ствола (Рис. 4).

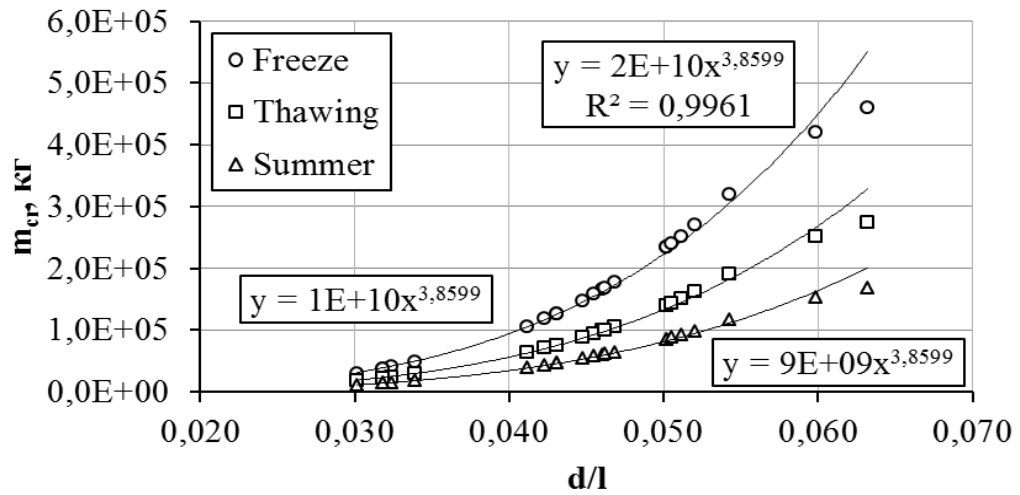


Рис. 3. Зависимость критической массы от отношения d/l как морфометрического маркера механической устойчивости.

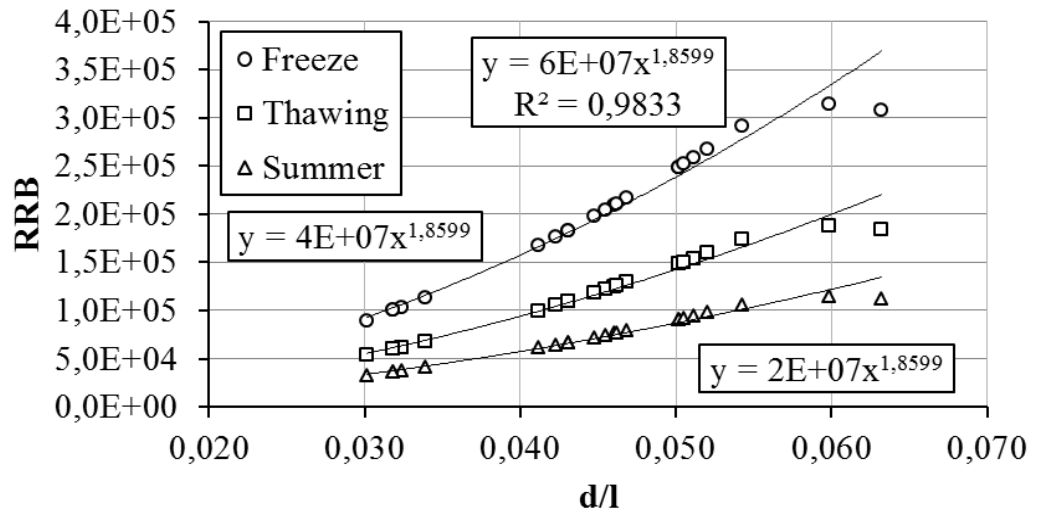


Рис. 4. Зависимость относительного сопротивления на изгиб от отношения d/l как морфометрического маркера механической устойчивости.

Регрессионный анализ показал достоверную связь между жесткостью на изгиб и d/l ($R^2=0.98$). Тангенс угла наклона при изменении температуры составлял 3,7, а показатель степенной зависимости изменялся в зависимости от температуры воздуха (Рис. 5). В среднем при заморозке, жесткость на изгиб стволов старовозрастных деревьев имеет значение $9,8 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$, а при оттаивании $5,9 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Такая потеря жесткости (EI) не критична для дуба черешчатого в

возрасте более 100 лет и при сезонных изменениях температуры воздуха не приводит к потере механической устойчивости растения в целом.

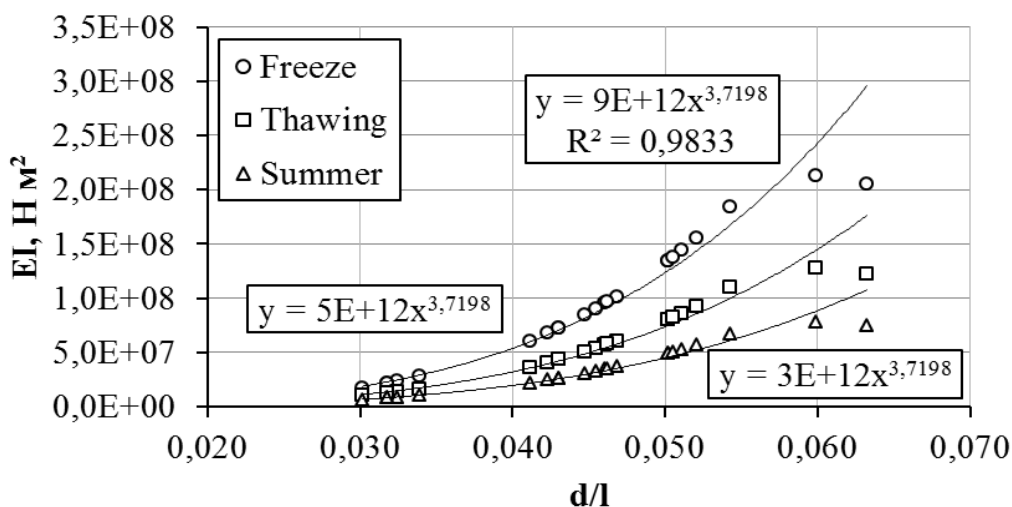


Рис. 5. Зависимость жесткости на изгиб от отношения d/l как морфометрического маркера механической устойчивости.

При анализе тесноты связи (r_{xy}) между параметрами механической устойчивости (P_{cr} , m_{cr} , RRB , EI) и отношением диаметра ствола растения к его высоте (d/l) с учетом возраста растений, выявлена весьма высокая связь для старовозрастных деревьев *Quercus robur* L. произрастающих в Путиловской байрачной дубраве (Табл. 1). Полученный результат статистического анализа можно использовать при мониторинге дубрав с целью выявления растений с низкой механической устойчивостью по показателю d/l как морфометрического маркера устойчивости дерева.

Таблица 1.

Теснота связи (r_{xy}) параметров механической устойчивости от d/l , с учетом возраста деревьев дуба черешчатого

Возраст	Параметры механической устойчивости			
	P_{cr}	m_{cr}	RRB	EI
105-150	0,97	0,97	0,97	0,96
151-200	0,96	0,96	1,00	0,96
201-254	1,00	1,00	1,00	1,00
Общее (105-254)	0,95	0,95	0,98	0,96

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На восточных границах ареала произрастания этого вида самые старые дубравы произрастают в редких естественных насаждениях и в насаждениях, созданных Скряжинским в 1819 году, фон Граффом в 1843 году и Леманом в 1875 году. Таким образом, возраст самых старых деревьев в этих древостоях составляет 140-200 лет. Вполне возможно, что в степной зоне есть более старые экземпляры дуба, растущие в соответствующих местных условиях. Эти факты и возраст *Quercus robur* L. в Путиловском лесу позволяют предположить, что деревья дуба черешчатого произрастающие в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж), могут достигать возраста около 200 лет и при этом сохранять высокую механическую устойчивость ($m_{cr}=10^5$ кг, $EI=9,8*10^7$ Н·м²), даже при действии неблагоприятных метеорологических факторов. Это открывает перспективу планирования и посадки многолетних насаждений в смешанных городских и степных условиях.

Список литературы

1. Netsvetov M. The climate to growth relationships of pedunculate oak in steppe / M. Netsvetov, M. Sergeyev, V. Nikulina [et al.] // Dendrochronologia. – 2017. – Vol. 44. – P. 31–38.
2. EUFORGEN Distribution map of Pedunculate oak (*Quercus robur*). – 2009. <http://www.euforgen.org>
3. Nilsson S. G. Densities of large living and dead trees in old-growth temperate and boreal forests. / S. G. Nilsson, M. Niklasson, J. Hedin [et al.] // For. Ecol. Manage. – 2002. – Vol. 161. – P. 189–204.
4. Belova N. A. Forest and steppe soils (ecology, micromorphology, genesis / N. A. Belova, A. P. Travleev – Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk University Press, 1999. – 348 p.
5. Le Roux D. S. The future of large old trees in urban landscapes / Le Roux D. S., Ikin K., Lindenmayer D. B. [et al.] // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9(6). – e99403.
6. Корниенко В. О. Биомеханика ствола *Robinia pseudoacacia* L. в онтогенезе / В. О. Корниенко // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2017. – №4. – С. 48–50.
7. Корниенко В. О. Влияние отрицательных температур на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus rubra* L.) / В. О. Корниенко, М. В. Нецветов // Промышленная ботаника. – 2013. – №13. – С. 180–186.
8. Корниенко В. О. Влияние температуры на биомеханические свойства древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта / В. О. Корниенко, В. Н. Калаев, А. О. Елизаров // Сибирский лесной журнал. – 2018. – №6. – С. 91–102.
9. Goldstein G. Tropical tree physiology. Adaptations and responses in a changing environment / G. Goldstein, L. S. Santiago (Eds.). – Springer Int. Publ. Switzerland, 2016. – 467 p.
10. Niklas K. J. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density / K. J. Niklas, H.-C. Spatz // American Journal of Botany. – 2010. – Vol. 97(10). – P. 1587–1594.
11. Niklas K. J. Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function / K. J. Niklas. – Chicago: Univ. Chicago Press, 1992. – 622 p.
12. Sellier D. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds / D. Sellier, T. Fourcaud // American Journal of Botany. – 2009. – Vol. 96. – P. 885–896.

MECHANICAL STABILITY OF OLD-AGE *QUERCUS ROBUR* L. TREES IN THE CONDITIONS OF THE CITY OF DONETSKKornienko V. O.¹, Kalaev V. N.², Kharchenko N. N.³¹Donetsk National University, Donetsk, DPR²Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation³Voronezh State Forest Engineering University named by G. F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

E-mail: kornienkovo@mail.ru

The field data were used to evaluate the mechanical resistance of the old-age trees of *Quercus robur* L. in the Putylivsky ravine oak forest. It was established that the value of the ratio between the trunk diameter and its height (d/l) was on average 0.05 ± 0.01 for all the studied specimens. The regression analysis was used to reveal a reliable correlation between d/l and the critical load and the mass which a tree can withstand under seasonal temperature variations. For example, in winter, when the temperature is below zero the values of P_{cr} and m_{cr} for trees over 100 years old were high (10^5 kg), which are beyond what is achievable even under the wind forces characteristic of the region, and under conditions of snow and ice storms. The relative resistance to bending directly depends on the physical and mechanical characteristics of the wood. As a result, the research showed that with a growing diameter of the tree trunk the RRB of the pedunculate oak grows in the power-law relation ($R^2=0.98$; $x^{1.86}$), that is why the temperature factor should not influence the resistance of old-age trees with a sufficient ratio between d/l and the trunk strength margin. The regression analysis showed a reliable correlation between the bending stiffness and d/l ($R^2=0.98$). The slope of the logarithmic dependence under temperature variations was 3.7 and the value of the power-law relation changed depending on the air temperature. On average, when freezing, the bending stiffness of the trunks of old-age trees was $9.8 \cdot 10^7$ N·m², and when thawing it was $5.9 \cdot 10^7$ N·m². Such a reduction in stiffness (EI) is insignificant for pedunculate oaks older than 100 years old and the seasonal temperature changes do not lead to a reduction in the mechanical resistance of the plant as a whole. The analysis of the strength of relationship between the parameters of the mechanical resistance (P_{cr} , m_{cr} , RRB, EI) and the ratio between the diameter of the tree trunk and its height (d/l) with due consideration of the age of the plants revealed a strong relationship for the old-age trees of *Quercus robur* L. growing in the Putylivsky ravine oak forest. The obtained results of statistical analysis can be used to monitor oak forests in order to single out plants with low mechanical resistance with the help of the d/l parameter, which serves as a morphometric marker of tree resistance.

On the eastern boundaries of the habitat of the species, the oldest pedunculated oak forests grow as a part of rare natural forests and forests planted by Skryazhinsky in 1819, von Graff in 1843, and Leman in 1875. Thus, the oldest of the trees are 140–200 years old. There might be older oak specimens in the steppe region which grow under adequate local conditions. These facts and the age of *Quercus robur* L. trees in Putylivsky forest allow us to suppose that the pedunculate oak trees growing in the south of the East European Plain (Donetsk Ridge) can be about 200 years old and still be viable (6 points) and have a high mechanical resistance ($m_{cr}=10^5$ kg, $EI=9.8 \cdot 10^7$ N·m²) even under

unfavourable environmental conditions. This shows the benefit of planning and planting perennial tree plantations in mixed urban and steppe landscapes.

Keywords: *Quercus robur* L., mechanical stability, steppe zone, critical mass, morphometric stability marker, relative bending resistance, modulus of elasticity, biomechanics

References

1. Netsvetov M., Sergeyev M., Nikulina V., Korniyenko V., and Prokopuk Yu. The climate to growth relationships of pedunculate oak in steppe, *Dendrochronologia*, **44**, 31 (2017) DOI: 10.1016/j.dendro.2017.03.004
2. EUFORGEN Distribution map of Pedunculate oak (*Quercus robur*) (2009). <http://www.euforgen.org>
3. Nilsson S. G., Niklasson M., Hedin J., Aronsson G., Gutowski J. M., Linder P., Ljungberg H., Mikusinski G., and Ranius T. Densities of large living and dead trees in old-growth temperate and boreal forests, *For. Ecol. Manage.*, **161**, 189 (2002)
4. Belova N. A., and Travleev A. P. Forest and steppe soils (ecology, micromorphology, genesis) (Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk University Press, 1999), 348 p.
5. Le Roux D. S., Ikin K., Lindenmayer D. B., Manning A. D., and Gibbons P. The future of large old trees in urban landscapes, *PLoS ONE*, **9(6)**, e99403 (2014) doi:10.1371/journal.pone.0099403
6. Kornienko V. O. Biomechanics of the stem of *Robinia pseudoacacia* L. in ontogenesis, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy.* **4**, 48 (2017).
7. Kornienko V. O., Netsvetov M. V. The influence of negative temperatures on the mechanical resistance of red oak (*Quercus rubra* L.), *Industrial botany*, **13**, 180 (2013)
8. Kornienko V. O., Kalaev V. N., Elizarov A. O. The influence of temperature on biomechanical properties of woody plants in the conditions of protected and open grounds, *Sib. J. For. Sci.*, **6**, 91 (2018)
9. Tropical tree physiology. Adaptations and responses in a changing environment (Springer Int. Publ.: Switzerland, 2016), 467 p.
10. Niklas K. J., and Spatz H.-C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density, *American Journal of Botany*, **97(10)**, 1587 (2010) DOI: 10.3732/ajb.1000150
11. Niklas K. J. Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. (Chicago: Univ. Chicago Press, 1992), 622 p.
12. Sellier D., and Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds, *American Journal of Botany*, **96**, 885 (2009)