УДК 581.52+57.045+577.3

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ И АВАРИЙНОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В г. ДОНЕЦКЕ

© 2022 г. В. О. Корниенко<sup>*a*, \*</sup>, В. Н. Калаев<sup>*b*</sup>

<sup>а</sup>Донецкий национальный университет, ул. Университетская, 24, Донецк, 83001 Украина <sup>b</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, 394018 Россия \*E-mail: kornienkovo@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2020 г. После доработки 07.12.2020 г. Принята к публикации 01.12.2021 г.

В работе установлена связь между температурным фактором и биомеханическим параметром (модулем упругости) древесных тканей березы повислой (*Betula pendula* Roth). При оттаивании древесины модуль упругости в среднем снижается в 2-2.5 раза. Подобное снижение происходит неравномерно, ступенчато. Наибольшее влияние на механическую устойчивость дерева имеет скорость изменения модуля упругости от скорости оттаивания образца/ствола древесного растения. При оттаивании показатели параметров механической устойчивости снижаются в среднем на 45%. Такие изменения отражаются на углах отклонения ствола от вертикали, углах отхождения его скелетных ветвей, сопротивлении изгибу и устойчивости всего дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам. В условиях низкого антропогенного загрязнения показатель жесткости на изгиб для растений в возрасте 40-45 лет на  $22 \pm 2\%$  выше, чем в условиях повышенной антропогенной нагрузки города. В условиях антропогенной нагрузки под влиянием ветровых нагрузок, действия температуры и других погодных факторов, у березы повислой происходит трансформация архитектоники кроны, которая в условиях снежной бури и ледяного дождя приводит к необратимой деформации или обломам стволов. В результате на экспериментальных участках в г. Донецке, в период с 2014 по 2020 гг., выпало 63 дерева, а 168 растений подверглись необратимой деформации и имели высокую аварийность. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2-4 м (35%), 5-6 м (17%), 7-8 м (52%) и 9 м (6%). В процессе корреляционного анализа выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом d: l (отношение диаметра к длине ствола) и механической устойчивостью (R = 0.87), а также аварийностью (R = 0.79) деревьев березы повислой. В связи с этим представляется возможным использование коэффициента d: l как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж).

Ключевые слова: Betula pendula Roth, береза повислая, механическая устойчивость, аварийность, температура, ледяной дождь, урбанизированная среда, городские посадки. **DOI:** 10.31857/S0024114822020073

Экологическая адаптация древесных растений в городской среде к действию природно-климатических факторов является одной из важнейших задач функциональной экологии (Fournier et al., 2013; Dahle et al., 2017). Активно проводятся исследования по оценке механической устойчивости и аварийности деревьев под влиянием температуры окружающей среды (Green et al., 1999; Szmutku et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013; Корниенко и др., 2018), ветровых нагрузок (James et al., 2006; Dahle, Grabosky, 2010; James et al., 2014; Dahle et al., 2017; Jelonek et al., 2019), снеговых и ледяных бурь (Nock et al., 2016). Многие авторы также отмечают важность изучения влияния снежных и ледяных бурь, а также ветровых нагрузок на структуру и функционирование экосистем (Fahey et al., 2020; Klein et al., 2020), а также непосредственно оценку и частоту нарушений, вызванных такими природно-климатическими факторами (Curtis, Gough, 2018).

Влажность древесины оказывает влияние на механическую устойчивость растений, их модуль упругости и плотность древесины (Green et al., 1999; Szmutku et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013). В большинстве работ исследования проведены на образцах с влажностью 12% (техническая древесина) (Zelinka et al., 2007; Wood handbook ..., 1999, 2010; Virot et al., 2016). Лишь в отдельных ра-

ботах влажность исследуемых образцов доводили до 145% (Mishiru, Asano, 1984a,b; Green et al., 1999, Shmytku et al., 2012; Spatz, Pfisterer, 2013; Nocetti et al., 2015), что соответствует особым условиям хранения и эксплуатации древесных материалов. Влажность живой древесины варьирует в пределах 25(30)-225%, в зависимости от вида (Niklas, Spatz, 2010). Сезонная динамика факторов окружающей среды и физиологических показателей растений (переход из фазы покоя в фазу вегетации) отражается на содержании влаги в растительных тканях. Амплитуда колебаний влажности древесины связана со скоростью потери/сорбции влаги, которая уменьшается с увеличением плотности тканей и содержания в них экстрактивных веществ (Sell, 1989). С влажностью древесины связаны также показатели, которые определяют устойчивость целого дерева или его частей к природно-климатическим факторам. Вследствие этого полученные для технической древесины значения некорректно применять в расчетах устойчивости живого дерева (Раздорский, 1955; Burgert et al., 2001). Некоторые работы (Virot et al., 2016), в которых применяют данные по сухой (технической) древесине для моделирования поведения древостоев к действию природно-климатических факторов, сталкиваются с серьезной критикой со стороны научного сообщества (Albrecht et al., 2016) и в итоге сводятся к идеализированной модели, которая не может быть применена в прогнозировании живых древесных насажлений.

Ко всему вышесказанному можно добавить, что большинство упомянутых научных работ нацелены на исследования лесных массивов (естественных насаждений), исследований по изучению механической устойчивости насаждений в городской среде (городских посадок) крайне мало. Так, М.В. Нецветов с соавторами (Нецветов и др., 2009; Корнієнко та ін., 2009; Нецветов, Суслова, 2009) в условиях юго-востока Украины изучали механическую устойчивость древесных растений к действию вибрационно-акустических нагрузок техногенной природы. В рамках вибрационной экологии эти исследования являются фундаментальными и основополагающими, однако физико-механические свойства тканей деревьев из коллекции Донецкого ботанического сада изучались только на территории дендрария (зона низкой антропогенной нагрузки). В условиях действия антропогенных факторов, значения биомеханических параметров и, как следствие, механическая устойчивость древесины могут отличаться (Dahle et al., 2017). Таким образом, представляется крайне важным изучение физико-механических свойств тканей древесных растений в условиях урбанизированной среды, а также определение их механической устойчивости и

аварийности при сочетанном действии природно-климатических факторов.

Целью работы является оценка влияния природно-климатических факторов и антропогенного загрязнения на деревья березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж) на примере г. Донецка, для чего были обобщены результаты исследования городских посадок березы повислой в 2014—2020 гг.

В задачи исследования входили: 1) исследование влияния температуры на модуль упругости древесных тканей березы повислой *in vitro* (лабораторные исследования); 2) оценивание механической устойчивости березы повислой, произрастающей в условиях техногенной нагрузки, а также рисков при температурных изменениях; 3) изучение влияния природно-климатических факторов на аллометрию березы повислой в городских посадках г. Донецка; 4) оценка влияния сезонных природно-климатических факторов на аварийность березы повислой.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования нами была выбрана береза повислая (Betula pendula Roth). Согласно литературным данным, вид обладает высоким адаптивным потенциалом в условиях промышленного загрязнения (Neverova et al., 2013), т.е. обладает комплексом реакций, обеспечивающих приспосабливаемость растений к экстремальным условиям среды. По значению проницаемости мембран как интегрального показателя функционального состояния растительных тканей в условиях антропогенной нагрузки городской среды береза повислая имеет низкие значения, что говорит о высокой устойчивости к атмосферным загрязнениям и лучшей работе систем регуляции и поддержания гомеостаза по сравнению с другими исследованными видами в условиях городской среды (Сарбаева и др., 2013). По уровню устойчивости к высоким температурам, действию "суховея" и водоудерживающей способности вид среднеустойчив (Михеева и др., 2011).

Представленность березы повислой в городских посадках центральной части современного Донецка составляет ~5% (Суслова и др., 2012; Глухов и др., 2016), а в целом по городу ~2% (Поляков, 2009) от всех видов древесных растений. Критический возраст в условиях города составляет 50 лет (Корниенко, Калаев, 2018). Растение быстрорастущее, морозо- и засухоустойчиво, нетребовательно к почвам, в условиях города Донецка используется как в одиночных, так и групповых, аллейных посадках. Вдоль автомагистралей березу повислую используют как в первом, так и во втором ряду.

#### ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

	Интенсивность	Вибрационно-акустический шум, дБА					
Номер участка	движения, ед. ч <sup>-1</sup> $\overline{x} \pm s_x$	возле дороги (бордюр)		1 ряд деревьев		окраина древостоя	
		$\overline{x} \pm s_x$	MAX	$\overline{x} \pm s_x$	MAX	$\overline{x} \pm s_x$	MAX
1	$1060 \pm 54$	$78 \pm 5$	92	$74 \pm 2$	80	69 ± 1	73
2	$1681\pm211$	$79 \pm 4$	110	$76\pm2$	85	$62 \pm 5$	68
3	$1334\pm30$	$79 \pm 1$	86	$73 \pm 1$	79	$68 \pm 1$	73
4	—	$45 \pm 5^{*}$					

Таблица 1. Значения параметров антропогенной нагрузки от автотранспорта и вибрационно-акустического шума

\* Естественный шум в насаждениях.

Примечание. На рис.  $1-4 \overline{x} \pm s_x$  – среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение.

Таблица 2. Показатели токсических веществ в почвах и атмосферном воздухе на территории проведения исслелований

Howen wugerka	Загрязнение почвы, $\overline{x} \pm s_x$			Загрязнение атмосферного воздуха, $\overline{x} \pm s_x$		
помер участка	Zn, мг кг $^{-1}$	Cu, мг кг <sup>-1</sup>	Cr, мг кг <sup>-1</sup>	CO, мг м <sup>-3</sup>	$H_2S$ , мг м <sup>-3</sup>	$\rm NH_3,$ мг м $^{-3}$
1	$33.0\pm4.4$	$42.5\pm7.4$	$1.0 \pm 0.1$	$4.5\pm0.5$	—	_
2	< 0.01	$202.3\pm217.6$	$1.2\pm0.5$	$4.3\pm0.5$	$0.025\pm0.005$	$0.11 \pm 0.1$
3	$33.0 \pm 3$	$42.5\pm4.4$	$1.0\pm0.1$	$4.3\pm0.5$	$0.025\pm0.005$	$0.11 \pm 0.1$
4	—	$0.005\pm0.001$	$0.2\pm0.1$	$3.5\pm0.5$	$0.006\pm0.001$	—
ПДК	23*	3*	6*	5**	0.008**	0.2**

\* Подвижная форма.

\*\* Максимальная разовая концентрация. Примечание. Обозначения см. табл 1; "–" – не определилось.

В связи с недостаточной изученностью актуальных с фундаментальной и прикладной позиций вопросов по влиянию природно-климатических факторов на механическую устойчивость, аварийность, структурно-функциональную организацию и адаптацию березы повислой в условиях трансформированной среды обитания (Донецкий кряж на юге Восточно-Европейской равнины) необходимы дальнейшие исследования в этой области.

В качестве места проведения исследований было выбрано четыре территории (участки №№ 1-4). Длина исследуемых насаждений березы повислой на участке № 1 составляет ~385 м, ширина – около 50 м (пересечение Ленинского пр. и ул. Одесской). Растения посажены рядами, всего 7 полных рядов. В каждом ряду с расстоянием в 2–3 м высажены 112 ± 3 берез. Возраст деревьев ~45 лет. На участке № 2 (парк "Кованых фигур", пересечение основных автомагистралей — ул. Артема с ул. Университетской и пр-та Ватутина с пр-том Мира), растения произрастают вдоль пешеходных дорожек, высажены как солитеры. Возраст 7-20 лет. На участке № 3 (пр-т Ильича) деревья произрастают в линейных насаждениях вдоль автомагистрали. Возраст 40-50 лет. На участке № 4 (Дендрарий ГУ "Донецкий ботанический сад",

ЛЕСОВЕДЕНИЕ Nº 3 2022 южный массив, вдоль Макеевского шоссе), возраст деревьев 40-50 лет. Растения произрастают одиночно, в куртинах либо небольшими группами (3-5 ед.).

На исследуемых участках была рассчитана интенсивность автотранспортного движения в качестве оценки антропогенной нагрузки территории. Выявлено, что на участках №№ 1-3 преобладающим видом транспорта является пассажирский легковой автотранспорт (в среднем 800-1000 ед. ч<sup>-1</sup>), преимущественно автомобили иностранного производства. На участках с наиболее высокими показателями интенсивности автотранспортного потока были превышены значения акустического шума (табл. 1).

Уровень интенсивности транспортного потока вносит изменения в состав почв и атмосферного воздуха. Вследствие загрязнения атмосферного воздуха и почв увеличивается риск токсического воздействия на растения. Концентрации токсических веществ в атмосферном воздухе и почве вдоль магистралей на исследуемых участках показаны в табл. 2.

Исследования атмосферного воздуха показали, что концентрации большинства исследуемых веществ были в пределах ПДК. На участках № 2 и № 3 обнаружены превышения концентраций сероводорода, концентрации угарного газа были у верхней границы ПДК, обнаружено содержание аммиака (табл. 2).

Наибольшая концентрация меди обнаружена в почвах на территории, прилегающей к ул. Артема (центральной улице города), на участках № 1 и № 3 также зафиксированы превышения ПДК по меди (в 14 раз). На этих же территориях (участки № 1 и № 3) имеются превышения показателей концентрации цинка. На территории дендрария Донецкого ботанического сада все изученные показатели антропогенной нагрузки не превышали ПДК, поэтому мы считаем участок № 4 территорией с минимальной антропогенной нагрузкой.

Температурную зависимость модуля упругости проводили на побегах древесных растений, отобранных на исследуемых участках. Возраст отобранных побегов 3—5 лет, их срезали при отрицательных температурах в период покоя с нижней части кроны, не затеняемой в течение светового дня. Для контроля температуры образцов в них со стороны среза помещали термопару (модель TZ-A/BL алюминий) на глубину 1.5 см. Срезы покрывали герметичным материалом.

Модуль упругости древесных волокон определяли по величине изгиба цилиндра, обрезанной ветви, горизонтально защемленной в тисках, в ответ на приложение силы на ее свободном конце (методика детально описана в работах Корниенко, Нецветова (2014) и Корниенко и др. (2018)). Модуль упругости при температуре 15°С (температура воздуха в лаборатории) отличался, поэтому для сравнения его температурных зависимостей использовали значения, приведенные к МОЕ (modulus of elasticity=модуль упругости) при T = 15°С. Отбор образцов и исследования влияния температуры на модуль упругости древесины (МОЕ) проводились в феврале — начале марта каждого года (2014—2020 гг.).

Для оценки прочности и механической устойчивости березы повислой в условиях города использовали следующие параметры:  $P_{cr}$  и  $m_{cr}$  предельно допустимая нагрузка и масса, при действии которых ствол начинает деформироваться или обламывается;  $H_{cr}$  — критическая высота ствола, при достижении которой действие собственного веса привело бы к необратимой деформации или облому; *RRB* — относительное сопротивление изгибу; *EI* — сопротивление изгибу (методика детально описана в работе Корниенко, Калаева (2018).

Результаты визуального осмотра березы повислой фиксировались с помощью фотоаппарата Nikon Coolpix S2600, обработку и анализ изображений проводили в программе AxioVision Rel. 4.8. В результате выполнения работы для изучения архитектоники кроны, углов отхождения ствола и скелетных ветвей от нормали было обработано свыше 1500 электронных фотографий. В программе AxioVision Rel. 4.8. углы измерялись с помощью функций Measure  $\rightarrow$  Angle с точностью до 1°. Среднее значение параметра не демонстрировало полной картины поведения древесного растения при изгибе. В связи с этим мы выделили три участка (*A*, *Б*, *B*), разделяющих ствол растения по основным линиям изгиба, с указанием места произрастания дерева (рис. 1).

В условиях антропогенной нагрузки аллометрические исследования стволов березы повислой проводили на экспериментальном участке № 1 в период 2016—2017 и 2019—2020 гг. Такие временные рамки связаны с погодными условиями, при которых получены основные результаты по исследованию архитектоники кроны и аварийности березы повислой. Так, в эти годы на территории проведения эксперимента отмечались следующие природно-климатические условия: после длительного потепления в течение зимнего сезона температура воздуха резко опускалась до значений –20°С, выпадали сильные осадки (мокрый снег, снег), метель (порывы ветра 15–20 м с<sup>-1</sup>), налипание мокрого снега, наледи на побегах/стволах.

Диаметр ствола измеряли мерной вилкой, высоту деревьев - с помощью электронного высотомера HEC Haglof (Швеция). Жизнеспособность исследованных деревьев определяли по 8-бальной шкале Савельевой (Савельева, 1975), где 8 баллов это здоровое растение, сухие ветви в кроне отсутствуют, ствол не имеет повреждений, а 0 баллов это полное усыхание всего дерева. Возрастное состояние дерева определяли по Чистяковой (Чистякова и др., 1989). В работе имеются обозначения возрастных классов: I - 5-15 лет; II - 16-25 лет; III - 26-55 лет; IV - 56-75 лет. Аварийность каждого дерева определяли по методике, предложенной в работе (Корниенко, Приходько, 2018). При оценке древесных насаждений нами были использованы следующие методы: визуальный, ретроспективный, инструментальный (а – взятие керна прирастным буром для определения доли гнили в древесине, %; б – биомеханические испытания "Pullingtest"). Плотность (объемный вес) древесных волокон определяли методом погружения и взвешивания.

Для статистической обработки данных использовали программы "Statistica 8" (StatSoft Inc.) и "Excel 2010" (Microsoft Corporation). При построении графиков выводили уравнения регрессии и оценивали величину достоверности аппроксимации ( $R^2$ ). Достоверность отличий средних значений полученных данных между коэффициентом d: l и состоянием дерева (norm, deform, сrushed) определяли с использованием *t*-критерия Стьюдента. Для выявления достоверности между коэффициентом d: l и механической



**Рис. 1.** Углы отклонения стволов березы повислой на экспериментальном участке № 1 (общая схема).  $A - 10.43^{\circ}$ .  $B - 55.85^{\circ}$ .  $B - 113.17^{\circ}$ .

устойчивостью использовали коэффициент корреляции Пирсона (r), который считали отличным от нуля при p < 0.05.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биомеханические исследования березы повислой. Плотность древесных тканей в условиях г. Донецка составляет 980 ± 7 кг м<sup>-3</sup> вне зависимости от места произрастания.

Модуль упругости в условиях антропогенной нагрузки (экспериментальные участки №№ 1–3) города составляет 5.03 ± 0.77 ГН м<sup>-2</sup>, в условиях Донецкого ботанического сада (участок № 4 – дендрарий) – 4.30 ± 0.46 ГН м<sup>-2</sup>. Различия показателей биомеханических параметров достоверны при p < 0.05.

Влияние температуры на МОЕ древесных тканей березы повислой *in vitro* (лабораторные исследования). Зависимость МОЕ от температуры в общем виде для всех образцов имеет тенденцию к нелинейному падению при повышении температуры от 255 до 317 К (рис. 2).

При оттаивании изменение модуля упругости древесины у всех образцов происходит неравномерно, ступенчато. Число изломов кривой МОЕ (T) варьирует от 1 до 3, а температуры, при которых изменяется угол наклона МОЕ (T) – в пределах 2°–4°. Наибольшая крутизна наклона отмечается на участке от –16 до 0°С. Наши экспериментальные данные согласуются с данными, полученными в работах японских ученых А. Mishiro и I. Asano (1984а, б). Стоит отметить, что значения точек изгибов могут варьировать от видовых особенностей растений (например, анатомических и биохимических (Корниенко, Нецветов, 2014)). В наших экспериментах температура образцов изменялась со временем, как и изменялась скорость ее роста. Крутизна кривой модуля упругости от температуры снижается по мере падения скорости роста температуры образца. Видовые отличия в данном процессе не столь изучены и могут иметь место, например, при наличии ассимилянтов в живице, которое влияет на скорость льдообразования в сосудах.

При неравномерном оттаивании (нелинейная зависимость на рис. За, Зб), в момент, когда в образце находится уже оттаявшая свободная вода и кластеры льда, модуль упругости имеет максимальную скорость падения, что в свою очередь отражается на механической устойчивости и аварийности растения в целом. При локальных нагревах нарушается целостность морфологических структур, ствол дерева из однородной структуры переходит в неоднородную (посредством фазовых переходов воды в сосудах) и при этом теряет устойчивость. *In situ* такие эффекты наблюдаются при смене сезона, нетипичных климатических условиях во время, например, зимнего периода.

Влияние температуры на механическую устойчивость древесных растений, произрастающих в



Рис. 2. Влияние температуры на относительное значение модуля упругости древесных тканей березы повислой.



Рис. 3. Влияние скорости изменения температуры на скорость изменения модуля упругости древесины во времени.

условиях техногенной нагрузки. Параметр *EI* отражает способность древесного растения сопротивляться изгибу, при котором могут возникнуть необратимые деформации ствола/скелетной ветви при действии нагрузок различной природы. Искривление происходит при возникновении в поперечном сечении ствола/скелетной ветви изгибающих моментов.

Для березы повислой отношение  $EI \kappa d: l$  имеет степенную зависимость ( $R^2 = 0.83$ ). При оттаивании EI уменьшается на ~45%, что при сочетанном действии с природно-климатическими факторами окружающей среды может вызвать потерю механической устойчивости растения и привести к необратимой деформации стволов (рис. 4а).

Отношение *RRB* к d: l имеет линейную зависимость ( $R^2 = 0.87$ ), а  $P_{cr}$  к d: l степенную зависимость ( $R^2 = 0.97$ ). Параметры тесно связаны с показателем модуля упругости тканей растения и зависят от отношения диаметра ствола к его высоте. Наибольшему риску подвержены молодые растения (до 5–7 лет) и угнетенные вследствие роста в плотном древостое и борьбы за свет взрослые растения (имеют тонкие и высокие стволы d: l < 0.01, рис. 4б).

Предельно допустимая нагрузка дает точные значения критической массы при действии которой произойдут необратимые изменения/облом ствола (рис. 4в). Отношение d:l можно использовать также следуя зависимостям на рис. 3в, как морфометрический маркер устойчивости древесного растения. При значении d:l в диапазоне от 0.004 до 0.015 критическая масса варьирует в пределах от 11 до 815 кг, при этом ствол находится в замороженном состоянии, а с учетом температурных изменений (рис. 2 и 3) механическая устойчивость дерева снижается на ~45%, значения  $P_{cr}$ лежат в диапазоне от 6.2 до 458.9 кг.

Эти величины легко достигаются в условиях городской среды, при изменении температуры окружающей среды и действии ветровых и гравитационных нагрузок.

Полученные температурные зависимости МОЕ и параметров механической устойчивости объяс-



**Рис. 4.** Зависимость параметров механической устойчивости от отношения d/l (а–в) и возрастных классов (г). 1 – значение показателя в зимний период при отрицательной температуре, 2 – значение показателя при оттаивании, 3 – значение показателя в летний период при положительной температуре, 4 – значения, полученные на территории ГУ "Донецкий ботанический сад" (контроль), 5 – значения, полученные в условиях антропогенной нагрузки г. Донецка.

няют эффекты деформации и обломов стволов березы повислой в зимний период.

Исследование архитектоники кроны деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенного загрязнения г. Донецка (2017-2020 гг.). В условиях низкой антропогенной нагрузки на территории дендрария ГУ "Донецкий ботанический сад" деревья березы повислой обладают высоким баллом жизнеспособности (в хорошем состоянии -5-7 баллов по Савельевой), они не подвергались крушению и необратимым изгибам при ветровалах (2017–2020 г.), снеговых и ледяных штормах 2017 и 2020 г. Это объясняется зависимостью log EI от возраста (рис. 4г). В условиях относительного контроля показатель жесткости на изгиб на 22 ± ± 2% выше, чем в условиях антропогенной нагрузки города (p < 0.05). При этом углы отхождения от вертикали составляют не более 5°, а отношение *d* : *l* > 0.02.

В результате обследований городских посадок березы повислой в условиях высокой антропогенной нагрузки на участке № 1 в 2017 г. выявлено, что со стороны жилого дома углы отхождения стволов растений (их максимумы) больше в 2 ра-

ЛЕСОВЕДЕНИЕ № 3 2022

за, чем максимум для берез, растущих со стороны автомагистрали. В середине древостоя наблюдались практически ровные стволы с небольшим углом наклона  $2^{\circ}-6^{\circ}$  от вертикали (табл. 3).

В результате обследований в 2020 г. выявлено, что угол наклона стволов растений изменился и трансформировался (табл. 4). Среднее значение параметра уже не отражало и не описывало поведения древесного растения при изгибе. В связи с этим мы выделили три участка, разделяющих ствол растения по основным линиям изгиба: участок "A" от основания до первого изгиба ствола (~3 м), участок "B" – середина ствола растения, третий участок "B" с линией изгиба до вершины кроны.

На окраине древостоя наблюдались максимальные изгибы стволов. После снятия нагрузки положение дерева не изменялось, поэтому можно говорить о необратимой деформации. Всего после снежной бури были подвержены необратимой деформации 168 растений.

Влияние сезонных природно-климатических факторов на аварийность деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенной на-



**Рис. 5.** Зависимость сопротивления изгибу ствола дерева от отношения d: l. 1 - стволы имеют строго вертикальное направление роста, 2 - деформированные, изогнутые стволы, 3 - подверглись облому ствола.

**грузки.** В результате ветровала 2017 г. в первом ряду от жилого дома, там, где углы отклонения от вертикали имели значения  $40^{\circ}-45^{\circ}$ , выпало несколько растений. Исследовав их аллометрические параметры, экспериментально установили, что коэффициент d:l у таких деревьев  $\leq 0.01$ .

В 2020 г. в условиях снежной бури и ледяного дождя выпало 63 дерева. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2–4 м (35%), 5–6 м (17%), 7–8 м (52%) и 9 м (6%). В основном это растения с относительно тонкими стволами, d: l у которых составляет 0.01. Для таких растений были получены зависимости сопротивления изгибу от d: l с учетом их состояния: нормально растущие (погт, имеющие вертикальное направление  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ), деформированные (deform) или подвергшиеся облому ствола (crushed) в результате действия климатических факторов (снежных бурь и ледяного дождя) (рис. 5). Отношение *EI* к d: l для всех групп деревьев имеет степенную зависимость и высокий коэффициент детерминации  $R^2 \sim 0.89-0.99$ . Для вертикально растущих деревьев отношение d: l имело диапазон 0.03–0.05.

Деревья, произрастающие в условиях антропогенной нагрузки, обладают меньшей устойчивостью, что связано, во-первых, со значениями

	Число, шт.	Угол наклона ствола от вертикали, $^{\circ}$					
Место произрастания		$\overline{x} \pm s_x$	доля от общего числа, %	MAX	доля от общего числа, %		
Окраина древостоя со стороны жилого дома	91	$16 \pm 5$	60	43	40		
Окраина древостоя со стороны трассы	220	$15\pm 6$	40	26	60		
Середина древостоя	352	$4\pm 2$	90	$12 \pm 3$	10		

Таблица 3. Влияние места произрастания в древостое на угол отхождения ствола дерева березы повислой (2017 г.)

Примечания. Обозначения см. табл. 1.

Таблица 4.	Влияние места произрастания в древостое на угол отхождения ст	гвола дерева березы повислой (202	Юг.)
------------	---	-----------------------------------	------

Место произрастания	Угол наклона ствола от вертикали, град $\overline{x} \pm s_x$			
	участок А	участок Б	участок В	
Окраина древостоя со стороны жилого дома	18 ± 3	57 ± 7	$118 \pm 12$	
Окраина древостоя со стороны трассы	$14 \pm 3$	$49\pm 8$	96 ± 21	
Середина древостоя	$7\pm5$	$36 \pm 26$	$80 \pm 44$	

Примечания. Обозначения см. табл. 1.



**Рис. 6.** Зависимость диаметра ствола дерева от *d* : *l* как морфометрического маркера механической устойчивости. *1* – стволы имеют строго вертикальное направление роста, *2* – деформированные, изогнутые стволы, *3* – подверглись облому ствола.

дендрометрических параметров стволов растений (рис. 6), во-вторых, с увеличением высоты расположения биомассы дерева, и как следствие - приложением нагрузок в виде силы ветра, а также дополнительной массы при выпадении осадков в верхней трети от высоты дерева. Поэтому нами и были зафиксированы обломы стволов в основном двух вариантов: первый — на высоте 2-4 м (35%), т.е. у основания, когда при прогреве ствола образуется неоднородная структура и на высоте – 2-4 м создается концентрация напряжения механически нагруженного ствола; и второй на высоте 7-9 м (58% от общего числа обрушившихся растений), т.е. в верхней трети, что является классической экологической стратегией выживания дерева в условиях действия критических статических природно-климатических нагрузок (налипание снега, оледенение).

Использование коэффициента d : l как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой на юге Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж). Актуальность исследований, посвященных изучению связи между морфометрическими параметрами ствола d и h(l) и механической устойчивостью деревьев к ветровым и гравитационным нагрузкам отмечал еще Г.Б. Кофман в своей работе "Рост и форма деревьев" (1986). Он с целью нахождения механически устойчивого состояния дерева применял соотношение h(l):  $d \sim 10^2$  (т.е. отношение высота : длина ствола дерева к его диаметру у основания). Теоретически было установлено, что при h > 110r (h - 1)высота, r - радиус у основания) деревьям угрожает потеря упругой механической устойчивости. Однако автор при разработке математической модели, описывающей устойчивость живых деревьев, использовал физико-механические параметры (*E* – модуль упругости и ρ – плотность древесных тканей) технической (сухой) древесины хвойных пород, чего, по мнению других исследователей (Burgert et al., 2001), делать нельзя. Так, сухая древесина, обладающая высокой жесткостью и хрупкостью, существенно отличается от зеленой, живой древесины, которая является более упругой (имеется в виду значение модуля упругости, которое коррелирует со значением влажности (w)), и менее хрупкой (Burgert et al., 2001). Также значимым фактором механической устойчивости к действию природно-климатических факторов является индивидуальная адаптация древесных видов к условиям среды произрастания (Thomas, 2011). Поэтому расчеты, выполненные на растениях одного вида, без учета условий произрастания и особенностей физико-механических свойств древесины живых растений, некорректно использовать в качестве универсальной модели механического поведения дерева при нагрузках, а также вывода морфометрического коэффициента устойчивости/аварийности (Niklas, Spatz, 2012; Albrecht et al., 2016). В связи с этим актуальной задачей является нахождение для каждого вида древесных растений связи состояния (аварийности) и механической устойчивости с коэффициентом d: l, а также диапазона вариации этого соотношения с учетом условий произрастания.

В нашем исследовании при статистической обработке данных методом корреляционного анализа была выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом d: l и механической устойчивостью (r = 0.87), а также аварийностью (r = 0.79) деревьев березы повислой (табл. 5).

Отношение *d* : *l* для деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенной нагруз-

Состояние дерева	Отношение диаметра к длине ствола, <i>d</i> : <i>l</i>	Жесткость на изгиб, H/м <sup>-2</sup>
Norm	0.28-0.43	$1.59 \times 10^{6} - 8.93 \times 10^{6}$
Deform	0.08-0.015	$1.01 \times 10^4 - 10.49 \times 10^4$
Crushed	0.05-0.017	$1.01 \times 10^4 - 8.19 \times 10^5$

**Таблица 5.** Связь состояния дерева (аварийность) и его механической устойчивости с коэффициентом d: l

Примечание. Norm – стволы имеют строго вертикальное направление роста, Deform – деформированные, изогнутые, Crushed – подверглись облому ствола.

ки г. Донецка, в среднем составляло  $0.01 \pm 0.003$ . При таких значениях наблюдались необратимые деформации или обломы стволов/скелетных ветвей. Это может быть объяснено тем. что в условиях антропогенной нагрузки происходит нарушение физиолого-биохимических, клеточных, молекулярных и генетических процессов в растении (Поляков, 2009; Alonso-Serra et al., 2020). Внешним результатом действия загрязнения являются изменения морфометрических параметров стволов и кроны древесных растений (Поляков, 2009). Считается, что морфометрические параметры кроны и ствола древесного растения оказывают больший вклад в вариацию механической устойчивости и аварийности деревьев (Sellier, Fourcaud, 2009). В связи с этим представляется возможным использование коэффициента *d* : *l* как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж). Возможно, для других видов растений связь диапазона варьирования d: l в пределах 0.01 и состояния дерева будет также прослеживаться. этот показатель может быть универсальным, однако это требует дальнейших исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено влияние температуры на модуль упругости древесных тканей березы повислой. Показатель достоверно снижается при оттаивании в среднем в 2–2.5 раза, снижение МОЕ происходит неравномерно, ступенчато. Наибольшее влияние на механическую устойчивость дерева имеет скорость изменения модуля упругости (dMOE:dt) от скорости оттаивания образца/ствола древесного растения (dT:dt).

При оттаивании показатели параметров механической устойчивости снижаются в среднем на 45%. Такие изменения отражаются на углах отклонения ствола от вертикали, углах отхождения его скелетных ветвей, сопротивлении изгибу и устойчивости всего дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам. В условиях низкого антропогенного загрязнения показатель механической устойчивости  $\log EI$  для растений в возрасте 40–45 лет на  $22 \pm 2\%$  выше, чем в условиях повышенной антропогенной нагрузки города (p < 0.01). В условиях антропогенной нагрузки под влиянием ветровых нагрузок, температуры, снежных и ледяных бурь происходит трансформация архитектоники кроны березы повислой. Такие изменения приводят к необратимой деформации или обломам стволов, в условиях снежной бури и ледяного дождя. В результате 168 растений подверглись необратимой деформации и имели высокую аварийность, выпало 63 дерева. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2–4 м (35%), 5–6 м (17%), 7–8 м (52%) и 9 м (6%).

В процессе корреляционного анализа была выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом d:l и механической устойчивостью (r = 0.87), а также аварийностью (r = 0.79) деревьев березы повислой. В связи с этим представляется возможным использование коэффициента d:l как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Глухов А.З., Хархота Л.В., Пастернак Г.А., Лихацкая Е.Н.* Современное состояние дендрофлоры города Донецка // Самарский научный вестник. 2016. Т. 2(15). С. 20–24.

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., Елизаров А.О. Влияние температуры на биомеханические свойства древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта // Сибирский лесной журн. 2018. № 6. С. 91–102.

Корниенко В.О., Нецветов М.В. Влияние отрицательных температур на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus rubra* L.). // Промышленная ботаника. 2013. Вып. 13. С. 180–186.

Корниенко В.О., Нецветов М.В. Криоскопия влаги и температурная зависимость модуля упругости древесины // Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова". 2014. Т. 16. С. 88–94.

Корнієнко В.О., Нецветов М.В., Нікуліна В.М., Суслова О.П. Дослідження стійкості дерев до вібрацій // Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2009. Вип. 44. С. 185–193.

Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.

*Михеева М.А., Федорова А.И.* Влияние высоких температур на устойчивость древесных растений в городской среде // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2011. № 2. С. 166–175.

Нецветов М.В., Суслова Е.П., Никулина В.М., Корниенко В.О. Механическая устойчивость деревьев к антропогенным вибрационным нагрузкам // Фізичні методи в екології, біології та медицині. Програма і збірник тез ІІ міжнародної конференції. Львів–Ворохта, Україна, 2-6 вересня 2009 р. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2009. С. 22–23.

*Нецветов М.В., Суслова Е.П.* Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам // Промышленная ботаника. 2009. № 9. С. 60–67.

Поляков А.К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды. Донецк: Ноулидж, 2009. 268 с.

*Раздорский В.Ф.* Архитектоника растений. М.: Советская наука, 1955. 432 с.

*Савельева Л.С.* Устойчивость деревьев и кустарников в защитных лесных насаждениях. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 168 с.

Сарбаева Е.В., Воскресенская О.Л., Воскресенский В.С. Оценка устойчивости древесно-кустарниковых растений в урбанизированной среде // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: http://science-education.ru/ru/article/view?id=9011 (дата обращения: 27.04.2020).

Суслова О.П., Поляков О.К., Нецветов М.В., Дацько О.М., Лихацька О.М. Життєздатність деревних рослин у міських вуличних насадженнях на південному сході України // Промышленная ботаника. 2012. Вып. 12. С. 12–18.

Чистякова А.А., Заугольнова Л.Б., Полтинкина И.В., Кутьина И.С., Лицинский Н.Н. Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Деревья и кустарники: методические разработки для студентов биологических специальностей. М.: Прометей, 1989. 106 с.

Albrecht A., Badel E., Bonnesoeur V., Brunet Y., Constant T., Defossez P., Langre E., Dupont S., Fournier M., Gardiner B., Mitchell S. J., Moore J. R., Moulia B., Nicoll B. C., Niklas K. J., Schelhaas M., Spatz H.-Ch., Telewski F. W. Comment on "Critical wind speed at which trees break" // Physical review. 2016. E 94. P. 067001-1–067001-2.

Alonso-Serra J., Shi X., Peaucelle A., Rastas P., Bourdon M., Immanen J., Takahashi J., Koivula H., Eswaran G., Muranen S., Help H., Smolander O., Su Ch., Safronov O., Gerber L., Salojarvi J., Hagqvist R., Mähönen A., Nieminen K., Helariutta Y. Elimäki locus is required for vertical proprioceptive response in birch trees // Current Biology. 2020. V. 30. Is. 4. P. 589–599.

*Burgert I., Bernasconi A., Niklas K.J., Eckstein D.* The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees // Holzforschung. 2001. V. 55. Is. 5. P. 449-454.

*Curtis P.S., Gough C.M.* Forest aging, disturbance and the carbon cycle // New Phytol. 2018. V. 219. P. 1188–1193.

Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A. A review of factors that affect the static loadbearing capacity of urban trees // Arboriculture & Urban Forestry. 2017. V. 43. Is. 3. P. 89–106.

*Dahle G.A., Grabosky J.C.* Variation in modulus of elasticity *(E)* along *Acer platanoides* L. (Aceraceae) branches // Urban Forestry & Urban Greening. 2010. V. 9. P. 227–233.

*Fahey R.T., Atkins J.W., Campbell J.L., Rustad L.E., Duffy M., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Schaberg P. G.* Effects of an experimental ice storm on forest canopy structure // Canadian J. Forest Research. 2020. V. 50. Is. 2. P. 136–145.

Fournier M., Dlouhá J., Jaouen G., Almeras T. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength // J. Experimental Botany. 2013. V. 64. No 15. P. 4793–4815.

*Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J.* Adjusting modulus of elasticity of lumber forchanges in temperature // Forest Products J. 1999. V. 49(10). P. 82–94.

*James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A.* Tree biomechanics literature review: dynamics // Arboriculture & Urban Forestry. 2014. V. 40. Is. 1. P. 1–15.

*James K.R., Haritos N., Ades P.K.* Mechanical stability of trees under dynamic loads // American Journal of Botany. 2006. V. 93. Is. 10. P. 1522–1530.

Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywiński W., Kopaczyk J., Klimek K. The biomechanical formation of trees // Drewno 2019. V. 62. № 204. P. 5–22.

*Klein R.W., Koeser A.K., Kane B., Landry S.M., Shields H., Lloyd S., Hansen G.* Evaluating the likelihood of tree failure in Naples, Florida (United States) following hurricane Irma // Forests. 2020. V. 11. Is. 485. P. 1–10.

*Mishiro A., Asano I.* Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part I. Moisture content below the fiber saturation point // J. Japan Wood Research Society. 1984a. V. 30(3). P. 207–213.

*Mishiro A., Asano I.* Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part II. Moisture content beyond the fiber saturation point // Ibid. 1984b. V. 30(4). P. 277–286.

*Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A.* Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth.) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo city // Middle East J. Scientific Research. 2013. V. 17. Is. 3. P. 354–358.

*Niklas K.J., Spatz H.-C.* Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density // American J. Botany. 2010. V. 97. Is. 10. P. 1587–1594.

*Niklas K.J., Spatz H.-Ch.* Plant Physics. Chicago: University of Chicago Press, 2012. 426 p.

*Nocetti M., Brunetti M., Bacher M.* Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber // European J. Wood and Wood Products. 2015. V. 73. P. 51–60.

*Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrange S., Messier Ch.* Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies // Annals of Botany. 2016. V. 117. Is. 7. P. 1163–1173.

*Sell J.* Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten // Lignum, Baufachverlag AG Zürich. 1989. 87 p.

*Sellier D., Fourcaud T.* Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds // American J. Botany. 2009. V. 96(5). P. 885–896. https://doi.org/10.3732/ajb.0800226

*Spatz H.-C., Pfisterer J.* Mechanical properties of green wood and tree risk assessment // Arboriculture & Urban Forestry. 2013. V. 39(5). P. 218–225.

*Szmutku M.B., Campean M., Laurenzi W.* Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties // Pro Ligno. 2012. V. 8(1). P. 35–43.

*Szmutku M.B., Campean M., Sandu A.V.* Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing // Ibid. 2011. V. 7. Is. 4. P. 26–31.

*Thomas S.C.* Size- and age-related changes in tree structure and function // Tree Physiology. 2011. Ch. 2. P. 33–64.

*Virot E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker E., Quere D., Clanet C.* Critical wind speed at which trees break // Physical Review. 2016. E 93. P. 023001-1–023001-7.

Wood handbook–Wood as an engineering material. Madison: WI, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

Wood handbook–Wood as an engineering material. Madison: WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

Zelinka S.L., Stone D.S., Rammer D.R. Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content // Wood Fiber Science: Journal of the Society of Wood Science and Technology. 2007. V. 39(4). P. 556–565.

# The Impact of Natural Climatic Factors on a Mechanical Stability and Accident Proneness of the Silver Birch Trees in Donetsk City Area

V. O. Korniyenko<sup>1, \*</sup> and V. N. Kalaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National University, Universitetskaya st. 24, Donetsk, 83001 Ukraine <sup>2</sup>Voronezh State University, Universitetskaya sq. 1, Voronezh, 394018 Russia \*E-mail: kornienkovo@mail.ru

The research established a correlation between the temperature factor and biomechanical parameters (such as the elasticity modulus) of silver birch (Betula pendula Roth) tissues. When the wood thaws, the elasticity modulus decreases on average by 2-2.5 times. This decrease is not uniform, but rather occurs in steps. The rate of elasticity modulus' change speed during the process of thawing of a specimen/trunk of a woody plant has the greatest influence on the mechanical stability of a tree. During thawing, the mechanical stability parameters get reduced by an average of 45%. Such changes are reflected in the angles of the trunk's divergence from the vertical axis, the angles of its skeletal branches relative to the trunk, tree's resistance to bending under wind and gravitational stress. Under the conditions of lower anthropogenic pollution, the bending stiffness of the plant at the age of 40–45 years is up to  $22 \pm 2\%$  higher than under the conditions of increased city anthropogenic burden. Under the conditions of anthropogenic stress, the influence of wind, temperature and other weather factors results in the transformation of birch's crown's architectonic, that leads to irreversible deformation or a complete break-off of trunks during blizzards or freezing rains. As a result, during the period from 2014 to 2020, 63 trees fell, and 168 plants underwent irreversible deformation and obtained a high accident risk status on the Donetsk experimental plots. Break-offs were found on plants at a height of 2.4 m (35%), 5.6 m (17%), 7.8 m (52%) and 9 m (6%). The correlation analysis revealed a strong positive relationship between the morphometric coefficient d: l (the ratio of the diameter to the length of the trunk) and mechanical stability (R = 0.87), as well as the accident rate (R = 0.79) of silver birch trees. In this regard, it seems possible to use the coefficient d : l as a morphometric marker of the silver birch trees' mechanical stability in the conditions of the south of the East European Plain (Donetsk ridge).

Keywords: Betula pendula Roth, silver birch, mechanical stability, accident proneness, freezing rain, urban environment, urban plantations.

#### REFERENCES

Albrecht A., Badel E., Bonnesoeur V., Brunet Y., Constant T., Defossez P., Langre E., Dupont S., Fournier M., Gardiner B., Mitchell S.J., Moore J.R., Moulia B., Nicoll B.C., Niklas K.J., Schelhaas M., Spatz H.-Ch., Telewski F.W., Comment on "Critical wind speed at which trees break", *Physical review*, 2016, E 94, pp. 067001-1–067001-2.

Alonso-Serra J., Shi X., Peaucelle A., Rastas P., Bourdon M., Immanen J., Takahashi J., Koivula H., Eswaran G., Muranen S., Help H., Smolander O., Su Ch., Safronov O., Gerber L., Salojarvi J., Hagqvist R., Mähönen A., Nieminen K., Helariutta Y., Elimäki locus is required for vertical proprioceptive response in birch trees, *Current Biology*, 2020, Vol. 30, Issue 4, pp. 589–599.

Burgert I., Bernasconi A., Niklas K.J., Eckstein D., The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous tree, *Holzforschung*, 2001, Vol. 55, Issue 5, pp. 449–454.

Chistyakova A.A., Zaugol'nova L.B., Poltinkina I.V., Kut'ina I.S., Lshtsinskii N.N., *Diagnozy i klyuchi vozrast-nykh sostoyanii lesnykh rastenii. Derev'ya i kustarniki* (The keys to diagnosis of the age state of forest plants. Trees and shrubs), Moscow: Prometei, 1989, 106 p.

Curtis P.S., Gough C.M., Forest aging, disturbance and the carbon cycle, *New Phytol*, 2018, Vol. 219, pp. 1188–1193.

Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A., A review of factors that affect the static loadbearing capacity of urban trees, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2017, Vol. 43, Issue 3, pp. 89–106.

Dahle G.A., Grabosky J.C., Variation in modulus of elasticity (*E*) along *Acer platanoides* L. (Aceraceae) branches,

Urban Forestry & Urban Greening, 2010, Vol. 9, pp. 227–233.

Fahey R.T., Atkins J.W., Campbell J.L., Rustad L.E., Duffy M., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Schaberg P. G., Effects of an experimental ice storm on forest canopy structure, *Canadian J. Forest Research*, 2020, Vol. 50, Issue 2, pp. 136–145.

Fournier M., Dlouhá J., Jaouen G., Almeras T., Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength, *J. Experimental Botany*, 2013, Vol. 64, No. 15, pp. 4793–4815.

Glukhov A.Z., Kharkhota L.V., Pasternak G.A., Likhatskaya E.N., Sovremennoe sostoyanie dendroflory goroda Donetska (Current state of Donetsk dendroflora), *Samarskii nauchnyi vestnik*, 2016, Vol. 2(15), pp. 20–24.

Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J., Adjusting modulus of elasticity of lumber forchanges in temperature, *Forest Products J.*, 1999, Vol. 49(10), pp. 82–94.

James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A., Tree biomechanics literature review: dynamics, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2014, Vol. 40, Issue 1, pp. 1–15.

James K.R., Haritos N., Ades P.K., Mechanical stability of trees under dynamic loads, *American J. Botany*, 2006, Vol. 93, Issue, 10, pp. 1522–1530.

Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywiński W., Kopaczyk J., Klimek K., The biomechanical formation of trees, *Drewno*, 2019, Vol. 62, No. 204, pp. 5–22.

Klein R.W., Koeser A.K., Kane B., Landry S.M., Shields H., Lloyd S., Hansen G., Evaluating the likelihood of tree failure in Naples, Florida (United States) following hurricane Irma, *Forests*, 2020, Vol. 11, Issue 485, pp. 1–10.

Kofman G.B., *Rost i forma derev'ev* (Growth and form of trees), Novosibirsk: Nauka, 1986, 210 p.

Kornienko V.O., Kalaev V.N., Elizarov A.O., Vliyanie temperatury na biomekhanicheskie svoistva drevesnykh rastenii v usloviyakh zakrytogo i otkrytogo grunta (The influence of temperature on biomechanical properties of woody plants in the conditions of protected and open grounds), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2018, No. 6, pp. 91–102.

Kornienko V.O., Kalaev V.N., *Mekhanicheskaya ustoichivost' drevesnykh porod i rekomendatsii po predotvrashcheniyu ikh avariinosti v gorodskikh nasazhdeniyakh* (Mechanical stability of tree species and recommendations for preventing their accident rate in urban plantings), Voronezh: Roza Vetrov, 2018, 92 p.

Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Krioskopiya vlagi i temperaturnaya zavisimost' modulya uprugosti drevesiny (Cryoscopy of wood moisture and temperature dependence of wood elasticity modulus), *Visti Biosfernogo zapovidnika "Askaniya-Nova"*, 2014, Vol. 16, pp. 88–94.

Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Vliyanie otritsatel'nykh temperatur na mekhanicheskuyu ustoichivost' duba krasnogo (*Quercus rubra* L.) (The influence of negative temperatures on the mechanical resistance of red oak (*Quercus rubra* L.)), *Promyshlennaya botanika*, 2013, Vol. 13, pp. 180– 186. Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Nikulina V.M., Suslova O.P., Doslidzhennya stiikosti derev do vibratsii (Investigation of the trees' endurance for vibrations), *Visnik L'vivs'kogo universitetu. Seriya fizichna*, 2009, No. 44, pp. 185–193.

Mikheeva M.A., Fedorova A.I., Vliyanie vysokikh temperatur na ustoichivost' drevesnykh rastenii v gorodskoi srede (Effect of high temperatures on the stability of trees in urban environments), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2011, No. 2, pp. 166–175.

Mishiro A., Asano I., Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part I. Moisture content below the fiber saturation point, *J. Japan Wood Research Society*, 1984a, Vol. 30(3), pp. 207–213.

Mishiro A., Asano I., Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part II. Moisture content beyond the fiber saturation point, *Ibid*, 1984b, Vol. 30(4), pp. 277–286.

Netsvetov M.V., Suslova E.P., Mekhanicheskaya ustoichivost' derev'ev i kustarnikov k vibratsionnym nagruzkam (Mechanical stability of trees and schrubs under vibration loads), *Promyshlennaya botanika*, 2009, No. 9, pp. 60–67.

Netsvetov M.V., Suslova E.P., Nikulina V.M., Kornienko V.O., Mekhanicheskaya ustoichivost' derev'ev k antropogennym vibratsionnym nagruzkam (Mechanical resistance of trees to anthropogenic vibration loads), *Physical methods in ecology, biology and medicine*, Program and Proc. of II International Conf., Lviv–Vorokhta, Ukraine, September 2–6, 2009, Lviv: Vidavnichii tsentr LNU im. I. Franka, pp. 22–23.

Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A., Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth.) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo city, *Middle East J. Scientific Research*, 2013, Vol. 17, Issue 3, pp. 354–358.

Niklas K.J., Spatz H.-C., Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density, *American J. Botany*, 2010, Vol. 97, Issue 10, pp. 1587–1594.

Niklas K.J., Spatz H.-Ch., Plant Physics, Chicago: University of Chicago Press, 2012, 426 p.

Nocetti M., Brunetti M., Bacher M., Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber, *European J. Wood and Wood Products*, 2015, Vol. 73, pp. 51–60.

Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrange S., Messier Ch., Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies, *Annals of Botany*, 2016, Vol. 117, Issue 7, pp. 1163–1173.

Polyakov A.K., Introduktsiya drevesnykh rastenii v usloviyakh tekhnogennoi sredy (Introduction of woody plants in a technogenic environment), Donetsk: Noulidzh, 2009, 268 p.

Razdorskii V.F., *Arkhitektonika rastenii* (Plant architectonics), Moscow: Sovetskaya nauka, 1955, 432 p.

Sarbaeva E.V., Voskresenskaya O.L., Voskresenskii V.S., available at: http://science-education.ru/ru/article/view? id=9011 (April 27, 2020).

Savel'eva L.S., *Ustoichivost' derev'ev i kustarnikov v zashchitnykh lesnykh nasazhdeniyakh* (Resilience of trees and shrubs in protective forest stands), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1975, 168 p.

Sell J., *Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten*, Lignum, Baufachverlag AG Zürich. 1989, 87 p.

Sellier D., Fourcaud T., Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds, *American J. Botany*, 2009, Vol. 96(5), pp. 885–896, DOI 10.3732/ajb.0800226

Spatz H.-C., Pfisterer J., Mechanical properties of green wood and tree risk assessment, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2013, Vol. 39(5), pp. 218–225.

Suslova O.P., Polyakov O.K., Netsvetov M.V., Dats'ko O.M., Likhats'ka O.M., Zhittezdatnist' derevnikh roslin u mis'kikh vulichnikh nasadzhennyakh na pivdennomu skhodi Ukraïni (Viability of woody plants in urban street stands in the South-East of Ukraine), *Promyshlennaya botanika*, 2012, Vol. 12, pp. 12–18.

Szmutku M.B., Campean M., Laurenzi W., Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties, *Pro Ligno*, 2012, Vol. 8(1), pp. 35–43.

Szmutku M.B., Campean M., Sandu A. V., Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing, *Ibid*, 2011, Vol. 7, Issue 4, pp. 26–31.

Thomas S.C., Size- and age-related changes in tree structure and function, *Tree Physiology*, 2011, Ch. 2, pp. 33–64.

Virot E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker E., Quere D., Clanet C., Critical wind speed at which trees break, *Physical Review*, 2016, E 93, pp. 023001-1–023001-7.

*Wood handbook*—Wood as an engineering material, Madison: WI, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p.

*Wood handbook*–Wood as an engineering material, Madison: WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999, 463 p.

Zelinka S.L., Stone D.S., Rammer D.R., Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content, *Wood Fiber Science: J. Society of Wood Science and Technology*, 2007, Vol. 39(4), pp. 556–565.