

УДК 577.3

В.О. Корниенко¹, М.В. Нецветов^{2,3}

¹ Донецкий национальный университет, ул. Университетская, 24, Донецк, 83055 Украина

² Донецкий ботанический сад НАН Украины, пр. Ильича, 110, , Донецк, 83059 Украина

³ Институт эволюционной экологии НАН Украины, ул. академика Лебедева, 37, Киев, 03143 Украина

e-mail: disfleur76@live.fr

КРИОСКОПИЯ ВЛАГИ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Замораживание, оттаивание, древесина, упругость

КРИОСКОПИЯ ВОЛОГИ І ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ДЕРЕВИНИ. В.О. Корнієнко, М.В. Нецветов. – У статті наведено результати криоскопії вологи деревини та температурні зміни її модуля пружності для 10 видів деревних рослин. Криоскопію проведено на пробах віджатої під тиском рідини з деревини та безпосередньо в пагонах рослин. Показано, що при охолодженні пагонів до від'ємних температур волога в судинах переохолоджується до $-3,0^{\circ}\text{C}$, а у віджатому стані до $-3,5^{\circ}\text{C}$. Збільшення температури T попередньо охолоджених до $-18...-33^{\circ}\text{C}$ пагонів призводить до падіння модуля пружності E деревини. Зниження E відбувається нерівномірно, ступінчато. Кількість "сходенок" та значення температурної координати точки зламу кривої $E(T)$ варіюють між зразками та видами. Загальною є точка зламу при температурі $T=0^{\circ}\text{C}$, яка відповідає температурі плавлення льоду більшості видів. Падіння модуля пружності при нагріванні пагонів відбувається синхронно із падінням швидкості зміни їхньої температури.

КРИОСКОПИЯ ВЛАГИ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ТКАНЕЙ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ. В.О. Корниенко, М.В. Нецветов. – В статье приведены результаты криоскопии влаги древесины и температурные изменения её модуля упругости для 10 видов древесных растений. Криоскопия проведена на пробах отжатої под давлением влаги древесины и непосредственно в побегах растений. Показано, что при охлаждении побегов до отрицательных температур влага в сосудах переохлаждается до -3°C , а в отжатом виде до $-3,5^{\circ}\text{C}$. При нагреве предварительно охлажденных до $-18...-33^{\circ}\text{C}$ побегов постоянное изменение температуры T приводит к снижению значения модуля упругости E древесины. Падение E происходит ступенчато. Количество "ступеней" и значение температурной координаты точек излома кривой $E(T)$ варьируют от вида к виду и от образца к образцу. Общей для всех кривых температурной точкой излома является $T=0^{\circ}\text{C}$, т.е. температура плавления льда для большинства видов. Падение модуля упругости при нагреве охлажденного образца происходит одновременно со снижением скорости изменения температуры.

CRYOSCOPY OF WOOD MOISTURE AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF WOOD ELASTICITY MODULUS. V.O. Korniyenko, M.V. Netsvetov. – The article focuses on the wood moisture cryoscopy and changes of its elasticity modulus temperature for 10 species of arboreal plants. Cryoscopy was carried out on the sampled by pressure moisture. The decreasing of temperature below zero resulted in overcooling of sampled moisture till -3.5°C and moisture in vessels of live branch till -3.0°C . Preliminary cooled to $(-18)-(-33)^{\circ}\text{C}$ branches losses their elasticity during gradual growth of temperature. Modulus decreases nonlinear by steps and simultaneously with changing of temperature growth speed. The break points differ among branch samples and species. The only one common point is the temperature of ice melting, i.e. 0°C .

Способность дерева удерживать собственную массу и противостоять внешним нагрузкам, например, в виде ветра и осадков, определяется его морфологическими характеристиками и механическими свойствами тканей. Считается, что постоянно изменяющиеся размеры частей кроны растения больше влияют на вариацию механической устойчивости растения, чем механические свойства (Sellier, Fourcaud, 2009). Модуль упругости тканей растения также не остается постоянным. Его величина зависит от

объемного соотношения различных типов тканей в частях растения (Niklas, 1992), которое изменяется по мере роста в зависимости от испытываемых нагрузок и доступности питательных ресурсов (Telewski, 2006). Кроме этого, на величину модуля упругости древесины оказывают влияние температура и влажность (Green et al., 1999; Szmurlo et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013).

Среди относительно небольшого количества исследований, посвященных этому вопросу, лишь единичные проведены на "живой" древесине. Её свойства отличаются от технической древесины, или пиломатериалов, наличием большего содержания влаги, несвязанной фракции, в первую очередь в просветах сосудов, а также растворённых в ней ассимилянтов. Растворы глюкозы, сахарозы, глицина и других соединений оказывают влияние на температуру и время замерзания влаги в тканях растения (Веретенников, 2006). На температуру замерзания/плавления воды и водных растворов ассимилянтов оказывает влияние и размер пор, в которых она находится (Колосовская и др., 1989). Температура плавления капиллярного конденсата лежит в интервале от 0 до -7°C .

Вода также может переохлаждаться, переходя в метастабильное состояние. При этом образование льда происходит при температуре на несколько градусов ниже температуры плавления. По всей видимости, понижение температуры плавления льда в гидрофильных системах, в том числе древесине, связано с существованием граничных слоев жидкости с измененной структурой (Колосовская и др., 1989). Тем не менее, остаётся не исследованным ряд актуальных с фундаментальной и прикладной позиций вопросов по температурному изменению биомеханики тканей древесных растений различных видов. С величиной реакции механических свойств древесины на вариации температуры, особенно при прохождении через точку замерзания воды, связаны изменения угла отхождения ветвей первого порядка от ствола, их изгиб и, в конечном итоге, устойчивость всего дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам.

Целью настоящей работы было определить температуру плавления/замерзания влаги в живой древесине и температурные зависимости её модуля упругости на примере десяти видов древесных растений.

Материалы и методы исследований

Криоскопию древесины и температурную зависимость модуля упругости проводили на побегах древесных растений 10 видов из коллекций Донецкого ботанического сада НАН Украины. Возраст отобранных побегов 3–5 лет, их срезали при отрицательных температурах в период покоя с нижней части кроны, не затеняемой в течение светового дня.

Криоскопию свободной влаги древесины *Quercus robur* L. и *Q. rubra* L. проводили в двух сериях. В первой определяли точку перехода из жидкого состояния в кристаллическое и в обратном направлении влаги, выжатой под давлением из побегов. Использовали модифицированный ГОСТ №30562-97 "Определение точки замерзания. Термисторный криоскопический метод". Пробу влаги охлаждали до заданной температуры (-18°C) и фиксировали время и температуру кристаллизации по выходу на плато кривой $T(t)$ (рис. 1), где T – температура, t – время. Для снижения эффекта переохлаждения пробу перемешивали проволокой диаметром 1–1,5 мм. Проволока колебалась горизонтально с амплитудой (около $\pm 1,5$ мм), не касаясь термисторного зонда и стенок пробирки. Стекланный контейнер для криоскопии проб (рис. 2) имел следующие параметры: длина – $45,0 \pm 0,1$ мм, наружный диаметр – $22,5 \pm 0,1$ мм, внутренний диаметр – $19,0 \pm 0,1$ мм. Через 30 минут раствор нагревали до комнатной температуры. О точке перехода "лёд-жидкость" судили так же, как и в предыдущем случае.

Во второй серии определяли точку перехода "лёд-вода" непосредственно в свежесрезанных побегах всех 10 видов древесных растений. Образцы (побеги) отбирали при температуре -3°C . С одного торца в них помещали хромель-алюмелиевую термопару на глубину 1 см. Для предотвращения испарения оба торца заделывали герметичным материалом. Затем образцы охлаждали в морозильной камере до $-15 \dots -33^{\circ}\text{C}$ и переносили в лабораторию с температурой воздуха $+12 \dots +15^{\circ}\text{C}$. Исследуемый побег закрепляли в штативе концом, в торце которого была фиксирована термопара. О фазовом переходе

судили по плато на кривой $T(t)$ (см. рис. 1). Одновременно проводили измерение продольного модуля упругости (E) общепринятым методом (Нецветов, 2009) через каждый 1°C ; погрешность измерения температуры составляла $0,25^\circ\text{C}$. Для каждого вида исследовалось от 1 до 15 образцов.

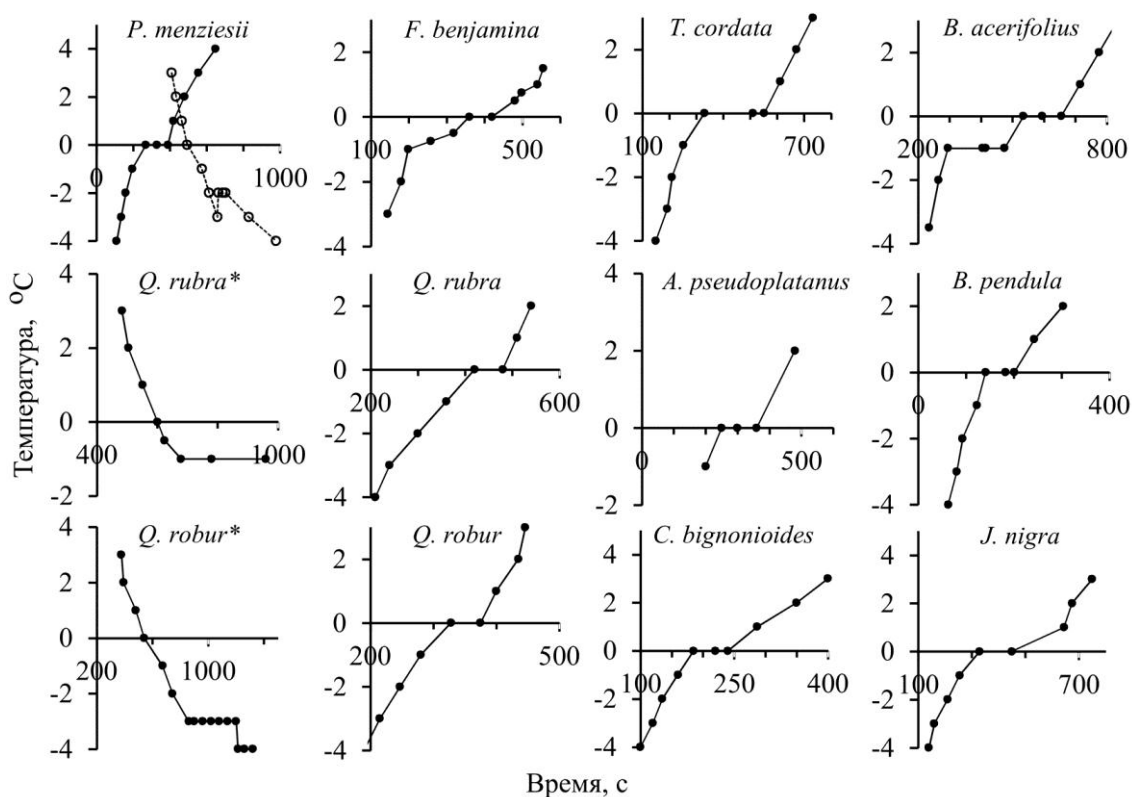


Рис. 1. Участки термограмм побегов

Примечание: * – проба отжаты влаги

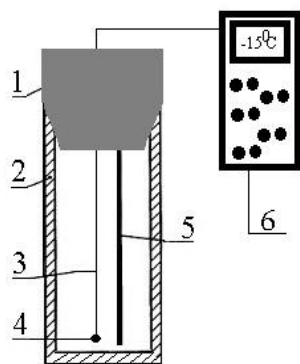


Рис. 2. Контейнер для проб

Условные обозначения:

- 1 – герметичная пробка,
- 2 – стеклянный контейнер,
- 3 – хромель-алюмелиевая термопара,
- 4 – термисторный зонд,
- 5 – проволока для перемешивания,
- 6 – осциллоскоп.

Результаты

Температура фазового перехода отобранных проб свободной влаги из древесины не совпадает в экспериментах с замораживанием и оттаиванием (таблица). Так, при постепенном понижении температуры проб кристаллизация начиналась при $-2 \dots -3,5^\circ\text{C}$, а при нагреве и оттаивании плавление происходило при $-1,5 \dots 0^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о переохлаждении проб в ходе понижения температуры, несмотря на использование устройства для перемешивания. Однако, как видно на примере свежесрезанного побега *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, в сосудах растения переохлаждение также имеет место. В связи с этим более корректными значениями точек фазового перехода "лёд↔жидкость" следует считать полученные в ходе экспериментов с оттаиванием проб отжаты влаги и прямого измерения температуры побегов.

Температура (°C) фазовых переходов "лёд↔жидкость" древесинной влаги и модуль упругости (ГН/м²) древесины при температуре 15°C

№ пп	Вид	Фазовый переход / количество повторностей (n)		Модуль упругости
		"жидкость→лёд"	"лёд→жидкость"	
1	2	3	4	5
1	<i>Quercus rubra</i> L.	-2 (n=3)*	-1 (n=6)	2,49±0,49
2	<i>Q. robur</i> L.	-3,5 (n=2)*	0 (n=2)	3,33±1,03
3	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	-3,5 (n=1) (-2) (n=1)	-1,5 (n=8)	1,26±0,33
4	<i>Juglans nigra</i> L.	-	0 (n=1)	2,33
5	<i>Catalpa bignonioides</i> Walt.	-	-0,75 (n=15)	2,09±1,02
6	<i>Brachychiton acerifolius</i> (A.Cunn. ex G.Don) Macarthur et C. Moore	-	-1 (n=6)	2,38±0,56
7	<i>Tilia cordata</i> L.	-	0 (n=4)	1,53±0,63
8	<i>Ficus benjamina</i> L.	-	-0,75 (n=3)	2,86±0,72
9	<i>Betula pendula</i> Roth	-	0 (n=8)	2,82±0,96
10	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	-	0 (n=4)	3,01±0,75

Примечание: * – эксперимент с пробой влаги из древесины

Изменение модуля упругости древесины при оттаивании у всех изученных видов происходит неравномерно, ступенчато. "Ступени" – участки кривой E (ГН/м²) от T (°C), на которых E не изменяется (рис. 3 А). Количество изломов кривой E (T) варьирует от 3 до 6, а температуры, при которых изменяется угол наклона E (T), в пределах 2–4°C. Вследствие этого на усредненной для всех видов зависимости E (T) изломы выражены менее четко (рис. 3 Б). Можно выделить следующие общие закономерности изменения модуля упругости с ростом температуры. На кривой E (T) определяются три участка с различным углом наклона. Первый участок располагается в диапазоне от -33 до -27...-25°C и отличается наибольшей крутизной. Второй – от -27...-25 до -1...-1°C, для катальпы до -4...-5°C. Третий участок находится в диапазоне положительных температур (до 44°C) и характеризуется наименьшей крутизной E (T). На усреднённой для 10 видов кривой выделяется одна точка излома, приходящаяся на 0°C. Как видно из рис. 4, скачки значений E происходят одновременно с возрастанием скорости нагрева образцов, характер которого нелинейный.

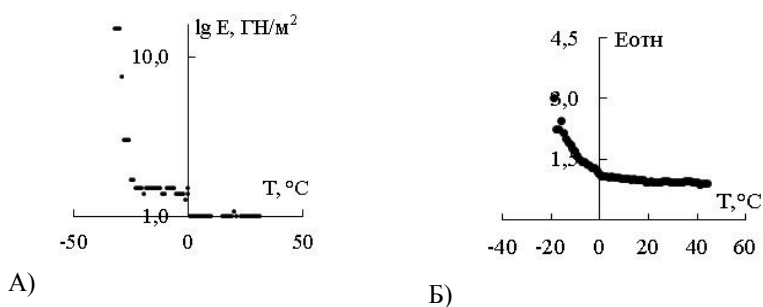


Рис. 3. Температурная зависимость модуля упругости древесины *Quercus robur* L. (А) и усредненного относительного модуля упругости древесины для 10 исследованных видов (Б)

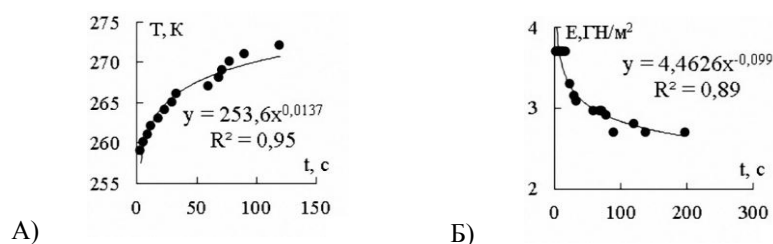


Рис. 4. Изменение модуля упругости (А) и температуры (Б) на примере образца *Betula pendula* Roth во времени

Обсуждение

Явление переохлаждения жидкости обычно связывают с отсутствием центров кристаллизации. Б.С. Чудиновым и В.И. Степановым (Chudinov, Stepanov, 1968) было показано, что в капиллярах переохлаждение жидкости наблюдается при -20°C даже в отсутствие растворенных веществ, снижающих температуру кристаллизации. В эксперименте с оттаиванием это явление наблюдаться не может. Поэтому с позиций физики точкой замерзания корректнее называть температуру, при которой влага переходит из твердой фазы в жидкую. Тем не менее, в живом растении решающее значение для изменения физиологического состояния и целостности его тканей и частей имеет реальная температура замерзания, независимо от наличия или отсутствия явления переохлаждения.

Неоднородность процесса оттаивания в побеге отражается на динамике $E(t)$ и температурном изменении $E(T)$ модуля упругости. Эксперименты со стационарными значениями температур проводили А. Миширу и И. Асано (Mishiro, Asano, 1984a, б). Они зафиксировали резкие изменения наклона температурных зависимостей E при $-20\dots-18^{\circ}\text{C}$ и $\sim 0^{\circ}\text{C}$. Отмеченная нами точка излома (около -26°C) несколько ниже, а точка $\sim 0^{\circ}\text{C}$ совпадает с зафиксированной японскими авторами. Кроме того, в работах А. Миширу и И. Асано (Mishiro, Asano, 1984a, б) кривая $E(T)$ имела наибольшую крутизну на участке от -20 до $\sim 0^{\circ}\text{C}$, тогда как в нашем эксперименте – на участке от -33 до -25°C .

Возможно, некоторые расхождения в значениях точек изломов в нашем эксперименте и работе указанных авторов обусловлены двумя причинами. Во-первых, влага в просветах сосудов древесины, находящаяся здесь в свободном виде, начинает замерзать при температуре $\sim 0^{\circ}\text{C}$, и лишь при -30°C она полностью переходит в твердое состояние. Связанная же с целлюлозой в стенках сосудов вода полностью замерзает при -80°C . Поэтому конкретные значения этих точек изломов могут варьировать у древесины разных видов вследствие анатомических особенностей, например, размеров просветов сосудов, или биохимических, т.е. состава и концентрации веществ, растворенных в живице. Содержание влаги в древесных волокнах, как показано в экспериментах А. Миширу и И. Асано (Mishiro, Asano, 1984a, б), Д.У. Грина с соавторами (Green et al., 1999), отражается на изменении крутизны кривой $E(T)$, но не на положении самой точки излома относительно оси температур.

Во-вторых, в нашем эксперименте температура образца не оставалась постоянной. Изменялась также и скорость её роста. Так, она падала по мере приближения к комнатной температуре. Крутизна кривой $E(T)$ снижается по мере падения скорости роста температуры образца. Видовые отличия здесь могут также иметь место. Например, наличие ассимилянтов в живице сказывается на скорости льдообразования (Веретенников, 2006).

Действие замораживания на побеги двух исследованных тропических видов привело к обильному выделению влаги у *Brachychiton acerifolius* (A. Cunn. ex G. Don) Macarthur et C. Moore и млечного сока у *Ficus benjamina* L. после оттаивания и снятия герметичного покрытия. Вероятно, это является следствием механического повреждения морозом стенок паренхимных клеток *B. acerifolius* и млечников *F. benjamina*. Многие виды растений семейства мальвовых, к которым относится и *B. acerifolius*, в той или иной степени развили способность запасать влагу в стеблях и побегах, которая позволяет компенсировать недостаток осадков или их неравномерное распределение в сезоне. В иностранной литературе такие растения получили название "*pachycaul*" (Eggli, Nyffeler, 2009), однако, анатомические особенности запасаания влаги их тканями исследованы слабо. Исключение среди них составляют лишь баобабы Мадагаскара, у которых живые клетки древесины сохраняются глубоко в объёме ствола, до 35 см от поверхности (Chapotin, Razanameharizaka, Holbrook, 2006).

Отдельного внимания заслуживает возможное экологическое и биологическое следствие температурного изменения модуля упругости древесины. Поскольку E прямо отражается на жесткости ствола и побегов, можно утверждать, что при переходе к отрицательным температурам устойчивость дерева к нагрузкам возрастает. Однако это увеличение может нивелироваться одновременным снижением предела прочности, связанной с хрупкостью льда. Интерес представляют также циклические переходы температуры от положительных значений к отрицательным и обратно. Как было показано в нашем экспе-

рименте, наличие градиента температур между древесиной и окружающим воздухом приводит к резким скачкообразным изменениям E . Соответственно, это отражается на жесткости побегов и на углах их отхождения от ствола, т.е. на архитектонике. Изменение E скачками при быстром нагреве, очевидно, связано с неравномерным во времени плавлением льда в объеме надземных частей растения. *In situ* это должно приводить к неравномерной потере жесткости вдоль ствола или побегов, а значит, к их деформациям в одной или нескольких точках. Уменьшение упругости побегов приводит также к снижению частоты собственных колебаний ствола или ветвей, что негативно сказывается на устойчивости к ветру. Его спектр расположен в диапазоне ниже 1 Гц, поэтому снижение частот колебания дерева увеличивает вероятность резонанса (Sellier, Forcaud, 2009).

Модуль упругости не остается постоянным и в диапазоне положительных температур. С ростом температуры он падает до 30% от контрольного значения (при $T=15^{\circ}\text{C}$). Подобный эффект хорошо изучен на технической древесине и используется в промышленности для придания нужной формы деревянным изделиям. Экстраполируя полученные данные на растение, можно сделать следующее предположение, которое требует дальнейшего изучения. При росте температуры потеря упругости должна приводить к медленным изгибам побегов, что, в свою очередь, отразится на площади проекции кроны, а также на её светопроницаемости и, как следствие, на температуре и влажности под пологом.

Выводы

При охлаждении побегов древесных растений до отрицательных температур влага в сосудах переохлаждается до -3°C , а в отжатом виде до $-3,5^{\circ}\text{C}$. При нагреве предварительно охлажденных до $-18...-33^{\circ}\text{C}$ побегов постоянное изменение температуры приводит к снижению значения модуля упругости древесины. Падение E происходит ступенчато. Количество "ступеней" и значение температурной координаты точек излома кривой E (T) варьируют от вида к виду и от образца к образцу. Общей для всех кривых температурной точкой излома является $T=0^{\circ}\text{C}$, т.е. температура плавления льда для большинства видов. Падение модуля упругости при нагреве охлажденного образца происходит одновременно со снижением скорости изменения температуры.

- Веретенников А. В. Физиология растений : Учебник / А. В. Веретенников. – М. : Академический Проект, 2006. – 480 с.
- Колосовская Е. А. Физические основы взаимодействия древесины с водой / Е. А. Колосовская, С. Р. Лоскутов, Б. С. Чудинов. – Новосибирск : Наука, 1989. – 216 с.
- Корниенко В. О. Влияние отрицательных температур на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus Rubra* L.) / В. О. Корниенко, М. В. Нецветов / Промышленная ботаника. – 2013. – Вып. 13. – С. 180–186.
- Нецветов М. В. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам / М. В. Нецветов, Е. П. Сулова // Промышленная ботаника. – 2009. – Вып. 9. – С. 60–67.
- Chapotin S. M. A biomechanical perspective on the role of large stem volume and high water content in Baobab trees (*Adansonia* sp.; Bombacaceae) / S. M. Chapotin, J. H. Razanameharizaka, N. M. Holbrook // American Journal of Botany. – 2006. – Vol. 93. – P. 1251–1264.
- Chudinov B. S. Phase mixture of water in frozen wood / B. S. Chudinov, V. I. Stepanov // Holtztechnologie. – 1968. – Vol. 9 (1) – P. 14–18.
- Eggl U. Living under temporarily arid conditions – succulence as an adaptive strategy / U. Eggl, R. Nyfeler // Bradleya. – 2009. – Vol. 27. – P. 13–36.
- Green D. W. Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature / D. W. Green, J. W. Evans, J. D. Logan, W. J. Nelson // Forest Products Journal. – 1999. – Vol. 49, N 10. – P. 82–94.
- Mishiro A. 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 / A. Mishiro, I. Asano // Journal of Japanese Wood Res. Soc. – 1984a. – Vol. 30, N 3. – P. 207–213.
- Mishiro A. 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 / A. Mishiro, I. Asano // Journal of Japanese Wood Res. Soc. – 1984b. – Vol. 30, N 4. – P. 277–286.
- Niklas K. J. Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function / K. J. Niklas. – Chi-

- cago : University of Chicago Press, 1992. – 622 p.
- 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, N 5. – P. 885–896.
- Szmutku M. B.* Microstructure Modifications Induced in Spruce Wood by Freezing / M. B. Szmutku, M. Campean, A.V. Sandu // *Pro Ligno*. – 2011. – Vol. 7, N 4. – P. 26–31.
- Telewski F. W.* A unified hypothesis of mechanoperception in plants / F. W. Telewski // *American Journal of Botany*. – 2006. – Vol. 93. – P. 1466–1476.

Рекомендуєт к печати
С.А. Приходько