

## ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ *JUNIPERUS VIRGINIANA* L.

В. О. Корниенко<sup>1</sup>, В. Н. Калаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Поступила в редакцию 23.10.2017 г.

**Аннотация.** В статье приведены результаты экологического и биологического следствия температурного изменения модуля упругости древесины *Juniperus virginiana* L. При переходе к высоким положительным температурам устойчивость дерева к нагрузкам уменьшается. Потеря упругости приводит к неравномерной потере жёсткости вдоль ствола или побегов, что отражается на углах отхождения скелетных ветвей от ствола, т.е. на архитектонике. В свою очередь это влияет на площадь проекции кроны, на её светопроницаемость и, как следствие, на температуру и влажность под пологом. Установлено, что в ясную погоду в контрольных куртинах под пологом можжевельника виргинского интенсивность суммарного освещения была достоверно ниже, чем в эксперименте. На участках под «окнами» в пологе в ясную погоду освещённость достигала значений ~40-60(макс)% для экспериментальных и ~4-5(макс)% для контрольных куртин от открытого пространства. Температура воздуха внутри куртины в контроле ниже на ~30% чем в эксперименте, а температура почвы в верхних слоях на 19%. Достаточное поступление солнечной радиации в экспериментальных куртинах способствуют уменьшению их устойчивости и как следствие зарастание травянистой и древесно-кустарниковой растительностью. Исследование аллометрии и биомеханики растений показало, что при значениях коэффициента  $d/l$  менее 0,01 для растения нагрузка в несколько килограмм или даже его собственная масса становится критической и может привести к необратимым изгибам стволов и ветвей, или же к обрушению всего организма. Эта нагрузка легко достигается при повышении температуры в летний период до +40°C вследствие падения значения модуля упругости, а при действии динамического фактора в виде ветра критическая нагрузка снижается ещё на ~20%.

**Ключевые слова:** биомеханика, архитектоника, механические свойства, модуль упругости, освещённость, температурный режим

С точки зрения средообразующего влияния древостоя и формирования экологической структуры фитоценоза светопроницаемость крон деревьев играет определяющее значение. Просветы в кронах и между крон, как отмечает Ю.Л. Цельникер [1], являются основополагающими при формировании фотоклимата. В силу ряда причин, цельность крон и сомкнутость древостоя нарушается, поэтому световой и температурный режимы не остаются постоянными, как отмечал А.Л. Бельгард, и могут существенно отличаться от нормы. Таким образом, различают следующие типы светового состояния: нормальное, усиленное и ослабленное [2], а также гиперусиленное и меланизированное (по И.А. Иванько [3]).

Read J., Stokes A. выяснили, что условия произрастания влияют на механические свойства древесины всех видов [4], а у некоторых эта зависимость особенно выражена. В результате действия температуры, сезонных статических и динамических нагрузок, происходит изменение модуля упругости, жёсткости и как следствие потеря механической устойчивости растений [5-10], что приводит к изменению архитектоники кроны [11-16]. Согласно предварительным экспериментам [17] с ростом температуры модуль упругости ( $E$ ) падает до 30% от контрольного значения (при  $T=15^{\circ}\text{C}$ ), наблюдаются медленные изгибы побегов и изменение углов отхождения стволов и скелетных ветвей, что влияет на общую раскидистость и проекцию кроны. В связи с этим нами были исследованы особенности влияния

изменения биомеханических свойств тканей и аллометрии стволов и побегов, при высокой положительной температуре, на формирование экологических условий подпологового пространства и степени устойчивости насаждений.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на куртинах можжевельника виргинского *Juniperus virginiana* L. произрастающего в дендропарке Донецкого ботанического сада. Контрольная группа отличалась от экспериментальной наличием первого ряда можжевельника казацкого *Juniperus sabina* L. растущего по периметру и создающего преграду для прохождения прямых лучей. Экспериментальная группа – монокуртины можжевельника виргинского.

Исследования проведены в июле-августе 2017 года при средней температуре воздуха  $34 \pm 2$  °С, зарегистрированный максимум на открытом пространстве достигал  $+38$  °С. Освещённость измеряли прибором Люксметр «*Testo 540*». Погрешность измерений 1-3%. Температуру воздуха, почвы и влажность измеряли с помощью прибора «*АМТ-300*». Погрешность измерений 1°С. Значение влажности определялось в тестовом режиме и разделялось на 5 уровней:  $dry^+$  – очень сухо;  $dry$  – сухо;  $nor$  – нормально;  $wet$  – влажно;  $wet^+$  – очень влажно.

Продольный модуль упругости ( $E$ ) древесных волокон и механическую устойчивость определяли общепринятыми методами [18; 19]. Общую надземную биомассу определяли по Jenkins J.C. [20].

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. Коэффициент вариации вычисляли согласно рекомендациям Лакина [21]. Зависимость критической нагрузки ( $P_{cr}$ ), отношения общей надземной биомассы к массе критической ( $bm/m_{cr}$ ) от коэффициента  $d/l$  для исследуемых куртин *Juniperus virginiana* L. устанавливали с использованием степенной регрессионной модели. Для выявления достоверности между коэффициентом  $d/l$  и состоянием дерева ( $deform$ ,  $norm$ ) использовали коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фитоактинометрические исследования. В древостое можжевельника виргинского (эксперимент) сомкнутость – 0.5-0.7, кроны асимметрич-

ны, односторонне раскидисты, основная масса располагается в верхней трети, меж- и внутрикронные разрывы в пологе значительные, много световых окон (40-50%) наблюдается значительное опускание стволов (до поверхности земли) и скелетных ветвей на краю куртины. В результате этого изменяется проекция крон куртин, в среднем растения по периметру вываливаются на 3 метра от основного абриса. Распределение освещённости под пологом неравномерное (тип усиленный по Бельгарду).

В контроле сомкнутость – 0.9-1.0, кроны симметричны, меж- и внутрикронные разрывы в пологе встречаются редко, соответственно освещённость под его пологом более равномерная (тип ослабленный по Бельгарду).

В контрольных куртинах в ясную погоду под пологом можжевельника виргинского интенсивность суммарного освещения была достоверно ниже ( $P < 0.01$ ), чем в эксперименте (табл. 1). При переходе от ясной погоды к облачной ослабление освещённости в экспериментальных и контрольных куртинах снижалось, что соответствует фитоклиматическим условиям естественных лесов [1; 22] и искусственных насаждений в степи (И.А. Иванько). На участках под «окнами» в пологе в ясную погоду освещённость достигала значений ~40-60(макс)% для экспериментальных и ~4-5(макс) % для контрольных куртин от открытого пространства (95000 люкс).

Наличие под пологом у экспериментальных куртин можжевельника виргинского участков с усиленным освещением обуславливают достаточное поступление солнечной радиации для естественного развития подлеска (табл. 2). В насаждении экспериментальных куртин он более разнообразен и состоит из семян древесных видов и более зрелых кустарниковых, наблюдается зарастание травянистой растительностью. Около ~30% от площади куртин зарастают *Parthenocissus quinquefolia* Planch., который оплетает взрослые растения практически по всей высоте (6-7 м). Под пологом контрольных куртин травянистая и древесно-кустарниковая растительность очень редкая, встречаются единичные сеянцы *Lonicera tatarica* L., изредка встречается *Ptelea trifoliata* L. и *Parthenocissus quinquefolia* Planch.

Способность искусственных насаждений *Juniperus virginiana* L. противостоять натиску агрессивной травянистой и древесно-кустарниковой растительности во многом определит их устойчивость и возможность дальнейшего раз-

Таблица 1.

Освещённость на затенённых и осветлённых участках под пологом экспериментальных и контрольных насаждений *Juniperus virginiana* L.

| Показатель, люкс        | Эксперимент  |               | Контроль |           |
|-------------------------|--------------|---------------|----------|-----------|
|                         | Затенено     | Осветлено     | Затенено | Осветлено |
| Ясно                    |              |               |          |           |
| $\bar{X} \pm S_x$       | 16635±1049** | 38606±11402** | 1013±57  | 3420±267  |
| Максимум                | 19559        | 56000         | 1129     | 4424      |
| Минимум                 | 15018        | 20800         | 722      | 3200      |
| Коэффициент вариации, % | 6,3          | 29,5          | 5,6      | 7,8       |
| Облачно                 |              |               |          |           |
| $\bar{X} \pm S_x$       | 1068±73*     | 7648±681*     | 738±44   | 2118±213  |
| Максимум                | 1200         | 8648          | 803      | 2976      |
| Минимум                 | 949          | 6400          | 656      | 1045      |
| Коэффициент вариации, % | 6,9          | 8,9           | 6,0      | 10,1      |

Примечания:  $\bar{X} \pm S_x$  – среднее арифметическое ± стандартное отклонение; \* – различия с контролем достоверны (P<0.05); \*\* – различия с контролем достоверны (P<0.01)

вития. В контрольных куртинах основным естественным методом повышения устойчивости насаждений является создание под пологом насаждений теневых условий. В экспериментальных куртинах изменение фотоклимата повлекло за собой уменьшение их устойчивости и как следствие зарастание травянистой и древесно-кустарниковой растительностью.

Температурный режим. В результате изгибов

Таблица 2.

Видовой состав подлеска и подроста под пологом насаждений *Juniperus virginiana* L.

| Вид  | Эксперимент                  | Контроль                    |
|--|------------------------------|-----------------------------|
|  | ср. знач., шт.               | ср. знач., шт.              |
| <i>Acer campestre</i> L.                   | <1                           | -                           |
| <i>A. tataricum</i> L.                     | 1-2                          | <1                          |
| <i>A. negundo</i> L.                       | <1                           | -                           |
| <i>A. pseudoplatanus</i> L.                | <1                           | -                           |
| <i>Crataegus monogyna</i> Jacq.            | 2-3                          | <1                          |
| <i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh.          | 1-2                          | -                           |
| <i>Ptelea trifoliata</i> L.                | 2-3                          | <1                          |
| <i>Quercus robur</i> L.                    | 1-2                          | -                           |
| <i>Parthenocissus quinquefolia</i> Planch. | ~30% от общей площади куртин | ~5% от общей площади куртин |
| <i>Lonicera tatarica</i> L.                | 3                            | <1                          |

и потере механической устойчивости скелетных ветвей температурный режим под пологом изменился. Температура воздуха внутри куртины в

контроле ниже на ~30% чем в эксперименте, а температура почвы в верхних слоях на 19% (табл. 3).

В просветах под «окнами» для экспериментальных куртин влажность почвы на поверхности составляла dry<sup>+</sup>, на глубине 10 см имела значение dry/nor. В контрольных куртинах – nor, и wet/wet<sup>+</sup> соответственно. При заборе проб с глубины 15 см значение влажности в экспериментальных куртинах в среднем было wet, а в контрольных – wet<sup>+</sup>.

Аллометрические исследования. Площадь участков под «окнами» крон контрольных куртин незначительна – менее 5% от общей площади насаждений, тогда как под экспериментальными она была более 30%.

Таким образом, изначально тип световой структуры, формируемый насаждениями обеих групп – ослабленный, но в момент проведения фитоактинометрических измерений в древостое экспериментальной группы световое состояние характеризовалось как усиленное.

Неоднородность освещённости здесь обусловлена в первую очередь возрастным изменением архитектоники крон деревьев с образованием разрывов в них и световых «оконов» в подпологовом пространстве. Кроме того, из-за значительной длины и недостаточном диаметре при  $d/l \leq 0.01$  и температуре воздуха +37±1°C ( $r=0.87$ ) ветви и стволы можжевельника виргинского теряют жёсткость, прогибаются под собственным весом и лег-

Таблица 3.

Значение температуры и влажности на разной глубине для исследуемых куртин *Juniperus virginiana* L.

| Среда  | Глубина забора, см | Контр., °C | Эксп., °C | Открытое пространство, °C | Влажность            |                  |
|--------|--------------------|------------|-----------|---------------------------|----------------------|------------------|
|        |                    |            |           |                           | Контр.               | Эксп.            |
| Воздух | -                  | 22±1       | 32±1**    | 37±1                      | -                    | -                |
| Почва  | 5                  | 20±1       | 25±1*     | 29±1                      | nor                  | dry <sup>+</sup> |
|        | 10                 | 17±1       | 20±1*     | 25±1                      | wet/wet <sup>+</sup> | dry/nor          |
|        | 15                 | 15±1       | 18±1      | 23±1                      | wet <sup>+</sup>     | wet              |

Примечания: \* – различия с контролем достоверны (P<0.05); \*\* – различия с контролем достоверны (P<0.01)

ко отклоняются при действии ветра, особенно в верхней части дерева (рис. 1).

Областью выделены аварийные растения, де-

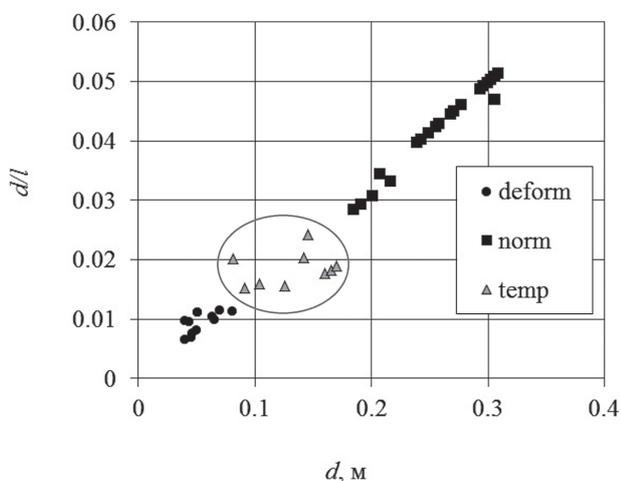


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $d/l$  *Juniperus virginiana* L. от диаметра ствола ( $d$ , м). Обозначения: *deform* – необратимая деформация; *norm* – вертикальный рост; *temp* – изогнутые в результате высокой летней температуры

формированные вследствие действия собственного веса и сезонных явлений (заморозка/оттаивание) внутри экспериментальных куртин (*deform*), а также изогнувшиеся/сломавшиеся под действием собственного веса и динамических нагрузок (ветра) вследствие изменения модуля упругости при высокой летней температуре (*temp*). Вертикально растущие *Juniperus virginiana* L. в контрольных куртинах имели значение  $d/l$  выше 0.01 и как следствие обладали высокой механической устойчивостью (*norm*).

Предельно допустимая нагрузка ( $P_{cr}$ ) прямо пропорциональна модулю упругости ( $E$ ). Наиболее вероятному риску облома под действием механических нагрузок подвержены молодые деревья, выросшие в плотном древостое и угнетённые вследствие конкуренции за свет взрослые растения (рис. 2). При значениях коэффициента  $d/l$  менее 0.01 для растения нагрузка в несколько килограмм или даже его собственная масса становится критической и может привести к необратимым изгибам стволов и ветвей, или же к обрушению всего организма (рис. 3). Это подтверждается степенной регрессионной моделью, коэффициент детерминации которой  $>0.99$ .

Следует отметить, что подобная зависимость была выявлена ранее для *Betula pendula* Roth, *Quercus robur* L. и *Robinia pseudoacacia* L. [23].

Критическая нагрузка легко достигается при

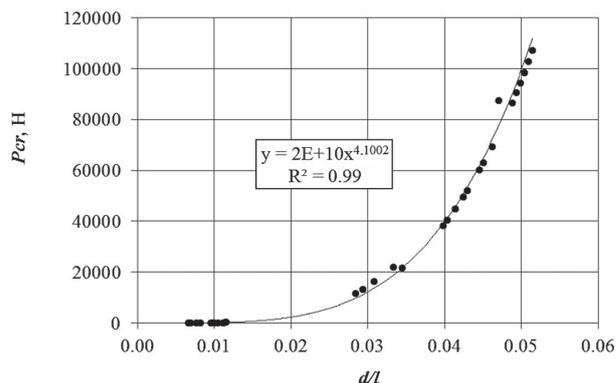


Рис. 2. Зависимость критической нагрузки от коэффициента  $d/l$  для исследуемых куртин *Juniperus virginiana* L.

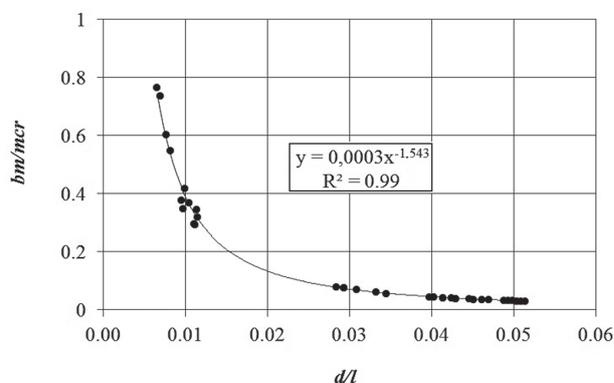


Рис. 3. Зависимость отношения общей надземная биомассы ( $bm$ , кг) к массе критической ( $m_{cr}$ , кг) от коэффициента  $d/l$  для исследуемых куртин *Juniperus virginiana* L.

повышении температуры в летний период до  $+40^{\circ}\text{C}$  вследствие падения значения модуля упругости, при действии динамического фактора она снижается ещё на  $\sim 20\%$  [24].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При высокой положительной температуре потеря упругости приводит к медленным изгибам побегов, что, в свою очередь, отражается на площади проекции кроны, а также на её светопроницаемости и, как следствие, на температуре и влажности под пологом. В первую очередь она будет сказываться на устойчивости деревьев низших классов жизненных состояний, которые характеризуются минимальным отношением диаметра ствола к высоте (коэффициент  $d/l \leq 0.01$ ) и наименьшим запасом прочности ствола.

2. Световое состояние насаждений является значимым фактором, влияющим на фито-климатические и биоэкологические особенности степ-

ных лесонасаждений. Изменение фотоклимата под пологом в сторону повышенной освещённости из-за изменения архитектоники приводит к снижению устойчивости и как следствие неспособности древесных растений сопротивляться натиску агрессивной травянистой и древесно-кустарниковой растительности.

### РЕКОМЕНДАЦИИ

Для предупреждения безвозвратных изгибов и обломов стволов в летнее время необходимо по возможности исключать или снижать действие света на нижнюю треть стволов деревьев, например обматыванием их защитным волокном или применением специальных чехлов. Укреплению канатами подлежат деревья, вытянувшиеся вследствие роста в затенённых условиях, подпорками – длинные скелетные побеги старых деревьев с углом отклонения от ствола около 90 градусов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цельникер Ю.Л. Радиационный режим под пологом леса. Москва, Наука, 1969, 98 с.
2. Бельгард А. Л. Степное лесоведение. Москва, Лесная промышленность, 1971, 336 с.
3. Иванько И.А. // Экологія та ноосферологія. 2008. Т. 19. № 3–4. С. 181-184.
4. Read J., Stokes A. // Am. J. Bot. 2006. Vol. 93, №10, P. 1546-1565.
5. Корниенко В.О., Нецветов М.В. // Промышленная ботаника. 2013. Вып. 13. С. 180–186.
6. Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J. // Forest Products Journal. 1999. Vol. 49(10), P. 82–94.
7. James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A. // Arboriculture & Urban Forestry. 2014. Vol. 40(1), P. 1–15.
8. Mishiro A., Asano I. // Journal of Japanese Wood Res. Soc. 1984 б. Vol. 30 (4), P. 277–286.
9. Szmутку М.В., Campean M., Laurenzi W., Pro Ligno, 2012, Vol. 8 (1), P. 35–43.
10. Szmутку М.В., Campean M., Porojan M. // Eur. J. Wood Prod. 2013. Vol. 71, P. 205–210.
11. Niklas K.J., Spatz H.C. // American Journal of Botany. Vol. 99(1), P. 169-170.
12. Niklas K.J., Spatz H.C. // Plant physics. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA. 2012. 426 p.
13. Niklas K.J. Plant Allometry: the scaling of form and process. Chicago: University of Chicago Press. 1994. 365 p.
14. Niklas K.J. Plant Biomechanics: an engineering approach to plant form and function. Chicago: University of Chicago Press. 1992. 607 p.
15. Niklas K.J. Tree Biomechanics with Special Reference to Tropical Trees. In: Goldstein G, Santiago LS (eds) Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment. Springer International Publishing, Cham, 2016, Vol. 6, P. 413-435. DOI: 10.1007/978-3-319-27422-5\_19
16. Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A. // Arboriculture & Urban Forestry. 2017. Vol. 43(3), P. 89–106.
17. Корниенко В.О., Нецветов М.В. // Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова". 2014. Т. 16, С. 88–94.
18. Нецветов М.В., Сусллова Е.П. // Промышленная ботаника. 2009. Вып. 9, С. 60–67.
19. Niklas K.J., Spatz H.C. // American Journal of Botany. 2010. V. 97 (10), P.1587–1594.
20. Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. // Gen. Tech. Rep. NE-319. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 2004. 45 p.
21. Лакин Г.Ф. Биометрия. Москва, Высшая школа, 1990, 352 с.
22. Алексеев В. А. Световой режим леса. Ленинград, Наука, 1975, 225 с.
23. Корниенко В.О. // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2017. №4. С. 48-50.
24. Sellier D., Fourcaud T. // American Journal of Botany. 2009. V. 96(5), P. 885–896. DOI: 10.3732/ajb.0800226

Донецкий национальный университет  
Корниенко В. О., ст. преп. кафедры биофизики  
Тел.: +38 (099) 221-26-90  
E-mail: dayterry@rambler.ru

Donetsk National University  
Kornienko V. O., lead educator by Dept. of Biophysics  
Тел.: +38 (099) 221-26-90  
E-mail: dayterry@rambler.ru

Воронежский государственный университет  
Калаев В. Н., доктор биологических наук, профессор кафедры генетики, цитологии и биоинженерии

Тел.: +7 910 345-00-72

E-mail: dr\_huixs@mail.ru

Voronezh State University.

Kalaev V. N., PhD (Biology), DSci. (Biology), Full Professor, dept. of Genetics, Cytology and Bioengineering

Ph.: +7 910 345-00-72

E-mail: dr\_huixs@mail.ru

## THE ECOLOGICAL SIGNIFICANCE OF THE BIOMECHANICAL PROPERTIES OF WOODY PLANTS ON THE EXAMPLE OF JUNIPERUS VIRGINIANA L.

V. O. Kornienko<sup>1</sup>, V. N. Kalaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Donetsk National University

<sup>2</sup> Voronezh State University

**Abstract.** The paper presents data on the ecological and biological effects of temperature changes on elasticity modulus of wood ( $E$ ) in *Juniperus virginiana* L. When passing to high temperatures, tree resistance to stress is reduced. Loss of elasticity causes uneven rigidity losses along the trunk or shoots reflected in branch union angle of skeleton branches with the trunk, i.e. in architectonics. In its turn, this fact affects the crown projection area, light permeability, and as a consequence, the temperature and water regimes under the canopy. The study has shown that in clear weather the intensity of total illumination under the pencil wood canopy in check tree clumps is significantly lower than in the trial. In the plots of openings under the canopy the clear-day illumination was ~40-60(max) % for the trial plots and ~4-5(max) % for the control areas. The air temperature in the canopy was at by ~30% lower in the check plots than in the experimental areas, the upper soil layer temperature being less by 19%. The sufficient solar radiation intake by experimental tree groups reduces their hardiness and, as a consequence, accounts for colonization by grasses and shrubby vegetation. The allometry and tree biomechanics researches have indicated that at  $d/l$  coefficient less than 0.01 the few kilogram load or even self-weight become critical for the tree and causes irreversible trunk and shoot bending or even fall of the whole organism. This load can easily be reached with summer temperature rise up to 40°C and consequential elasticity modulus fall. When affected by dynamic factor such as the wind, the critical load is reduced by extra 20%.

**Keywords:** biomechanics, architectonics, mechanical properties, modulus of elasticity, illumination, temperature conditions

### REFERENCES

1. Tsel'niker Yu.L. Radiatsionnyi rezhim pod pologom lesa. Moscow, Nauka Publ., 1969, 98 p.
2. Bel'gard A. L. Stepnoe lesovedenie. Moscow, Lesnaya promyshlennost', 1971, 336 p.
3. Ivan'ko I.A., J. of Ecology and Noospherology, 2008, Vol. 19, No. 3-4, P. 181-184.
4. Read J., Stokes A., American J. of Botany, 2006, Vol. 93, No. 10, P. 1546-1565. DOI: 10.3732/ajb.93.10.1546
5. Kornienko V.O., Netsvetov M.V., J. of industrial botany, 2013, No. 13, P. 180-186.
6. Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J., Forest Products Journal, 1999, Vol. 49(10), P. 82-94.
7. James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A., Arboriculture & Urban Forestry, 2014, Vol. 40(1), P. 1-15. DOI: 10.13140/RG.2.1.1089.1765
8. Mishiro A., Asano I., Journal of Japanese Wood Res. Soc., 1984 6, Vol. 30 (4), P. 277-286.
9. Szmurku M.B., Campean M., Laurenzi W., Pro Ligno, 2012, Vol. 8 (1), P. 35-43.
10. Szmurku M.B., Campean M., Porojan M., Eur. J. Wood Prod, 2013, Vol. 71, P. 205-210. DOI: 10.1007/s00107-013-0667-6
11. Niklas K.J., Spatz H.C. // American Journal of Botany. Vol. 99(1), P. 169-170.
12. Niklas K.J., Spatz H.C. Plant physics. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA. 2012. 426 p. DOI: 10.1119/1.4730936
13. Niklas K.J. Plant Allometry: the scaling of form and process. Chicago: University of Chicago Press. 1994. 365 p.
14. Niklas K.J. Plant Biomechanics: an

engineering approach to plant form and function. Chicago: University of Chicago Press. 1992. 607 p.

15. Niklas K.J. Tree Biomechanics with Special Reference to Tropical Trees. In: Goldstein G, Santiago LS (eds) Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment. Springer International Publishing, Cham, 2016, Vol. 6, P. 413-435. DOI: 10.1007/978-3-319-27422-5\_19

16. Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A., Arboriculture & Urban Forestry, 2017, Vol. 43(3), P. 89–106.

17. Kornienko V.O., Netsvetov M.V., News biosphere reserve "Askania nova" Scientific J., 2014, Vol. 16, P. 88–94.

18. Netsvetov M.V., Suslova E.P., J. of industrial botany, 2009, No. 9, P. 60–67.

19. Niklas K.J., Spatz H.C., American Journal of Botany, 2010, Vol. 97 (10), P.1587–1594. DOI: 10.3732/ajb.1000150

20. Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A., Gen. Tech. Rep. NE-319. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2004, 45 p.

21. Lakin G.F. Биометрија. Moscow, Vysshaya shkola, 1990, 352 p.

22. Alekseev V. A. Svetovoi rezhim lesa. Leningrad, Nauka, 1975, 225 p.

23. Kornienko V.O., Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy, 2017, No. 4, P. 48-50.

24. Sellier D., Fourcaud T. // American Journal of Botany. 2009. V. 96(5), P. 885–896. DOI: 10.3732/ajb.0800226