

УДК 581.52+57.045+577.3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МОЖЖЕВЕЛЬНИКА ВИРГИНСКОГО В УСЛОВИЯХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ¹

© 2024 г. В. О. Корниенко^{а, *}, В. Н. Калаев^б

^аДонецкий государственный университет, ул. Университетская, д. 24, Донецк, 83001 Россия

^бВоронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, Воронеж, 394018 Россия

*E-mail: kornienkovo@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

После доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 30.05.2023 г.

В работе установлена связь между температурным фактором, физико-механическим параметром — модулем упругости тканей древесины можжевельника виргинского (*Juniperus virginiana* L.) и его архитектурной кроны. Так, при высокой положительной температуре в летний период снижение модуля упругости приводит к медленному изгибам скелетных ветвей, что, в свою очередь, отражается на площади проекции кроны, а также на ее светопрозрачности и, как следствие, на температуре и влажности под пологом. В первую очередь температура будет сказываться на механической устойчивости деревьев, которые характеризуются критическим отношением диаметра ствола к его длине (коэффициент $d/l \leq 0.009$) и наименьшим запасом прочности ствола. В статье разработана схема механической устойчивости можжевельника виргинского — вследствие появления разрывов и в целом изменения архитектуры кроны, происходит неравномерный прогрев ствола, который приводит к нарушению его однородности по физико-механическим свойствам тканей. Выявлены необратимые деформации и многочисленные обломы растений на высоте в среднем 1.5 ± 0.5 м и в зоне корневой шейки. В результате нарушается световой режим древостоя, влияющий на фитоклиматические и биоэкологические особенности степных лесонасаждений. Изменение фитоклимата под пологом в сторону повышенной освещенности из-за изменения архитектуры приводит к снижению устойчивости и, как следствие, неспособности древесных растений сопротивляться натиску агрессивной травянистой и древесно-кустарниковой растительности.

Ключевые слова: можжевельник виргинский, древостой, температура, механическая устойчивость, жизнеспособность, аварийность.

DOI: 10.31857/S0024114824010084, EDN: SLLJXY

Адаптация древесных растений к действию природно-климатических факторов является важной компонентой их устойчивости в условиях степной зоны. Так, в результате действия высокой температуры в летний период происходит изменение модуля упругости тканей древесных растений (Корниенко, Калаев, 2018), что приводит к трансформации формы кроны за счет прогиба скелетных ветвей, а в совокупности с ветровой нагрузкой (James et al., 2006; Dahle, Grabosky, 2010; James et al., 2014; Dahle et al., 2017; Jelonek et

al., 2019), снежными и ледяными бурями (в зимний сезон) (Nock et al., 2016) все это отражается на механической устойчивости и аварийности не только отдельных деревьев, но и древостоев в целом (Корниенко, Калаев, 2022). Изменение архитектуры кроны дерева приводит к нарушению сомкнутости и цельности древостоев, увеличению светопрозрачности и, как следствие, изменению фитоклимата, что отражается на формировании экологической структуры фитоценоза (Бельгард, 1971; Нецветов, 2012). Как отмечал А.Л. Бельгард, именно количество просветов в кронах и между крон влияет на световой и температурный режим полого древостоев (Бельгард, 1971). Различают следующие типы светового состояния: нормальное, усиленное и ослабленное (Бельгард, 1971), а также гиперусиленное и меланизированное (Иванько, 2002). Изменение фитоклимата может отражаться

¹Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12).



Рис. 1. Контрольные (1) и экспериментальные (2) древостои можжевельника виргинского на территории дендрария Донецкого ботанического сада.

на формировании видового состава фитоценоза, его структуры, способности к саморегулированию и устойчивости в целом.

В связи с этим целью нашей работы было исследование влияния изменения биомеханических свойств тканей и аллометрии стволов и побегов под действием климатических факторов на формирование экологических условий подпологового пространства и степени устойчивости насаждений можжевельника виргинского.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования нами был выбран можжевельник виргинский, вечнозеленое двудомное дерево до 15 м высотой, с ширококонусовидной кроной. Согласно литературным данным, вид включен в список древесных растений, пригодных для озеленения экстремальных экотопов степной зоны (Козловский, 2009). Можжевельник виргинский обладает высокой зимостойкостью и засухоустойчивостью, вид также устойчив к болезням и вредителям, пыле- и газоустойчив (Козловский и др., 2009). Растет быстро, светолюбив, нетребователен к плодородию почв, выносит слабое засоление. Вид отнесен к высокодекоративным древесным растениям южной части Восточно-Европейской равнины (по параметрам: красивоплодные, декоративнолистные) (Козловский и др., 2009).

В ходе проведения экспериментальной части работы мы разделили объекты исследования на две группы: контроль и эксперимент. Контрольная группа отличалась от экспериментальной наличием первого ряда можжевельника казацкого (*Juniperus sabina* L.), растущего по периметру и создающего преграду для прохождения рассеянной солнечной радиации. Экспериментальная группа — монокультуры можжевельника виргинского, образованные

в 2017 г. после вырубки первого ряда можжевельника казацкого. Следует отметить, что до проведения санитарных мероприятий все растения экспериментальных куртин находились в одинаковых условиях с контролем и имели вертикальную ориентацию стволов.

Территория исследований. Мониторинговые исследования проводились с 2017 по 2022 гг. на куртинах можжевельника виргинского, произрастающих в дендрарии Донецкого ботанического сада (ДБС), расположенного в восточной части Донецка — крупного промышленного центра Донецкого региона (рис. 1).

Фитоактинометрические исследования. В летний период 2017–2021 гг. исследования проводили при средней температуре воздуха $34 \pm 2^\circ\text{C}$, зарегистрированный максимум на открытом пространстве достигал $+40^\circ\text{C}$. Освещенность измеряли люксметром Testo 540 (погрешность измерений 1–3%). Температуру воздуха, почвы и влажность измеряли с помощью прибора АМТ-300 (погрешность измерений 1°C). Значение влажности определяли в тестовом режиме и разделяли на 5 уровней: dry^+ — очень сухо; dry — сухо; nog — нормально; wet — влажно; wet^+ — очень влажно.

Аллометрические исследования. Результаты визуального осмотра можжевельника виргинского фиксировались с помощью фотоаппарата Nikon Coolpix S2600, обработку и анализ изображений проводили в программе AxioVision Rel. 4.8. Высоту деревьев измеряли с помощью электронного высоотомера HEC Haglof, диаметр стволов и скелетных ветвей — с помощью мерной вилки фирмы Haglof.

Жизненное состояние древесных растений определяли по методике В.А. Алексева (Алексеев, 1989).

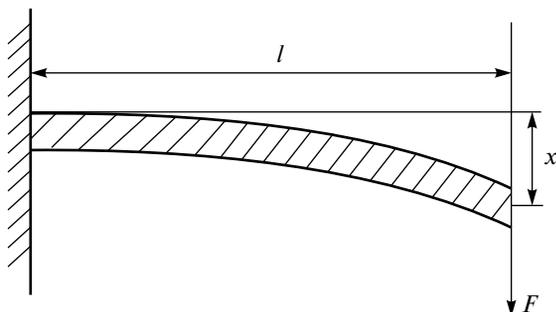


Рис. 2. Изгиб цилиндра (участок ветви) под действием приложенной к его концу силы $F = mg$, где l — длина цилиндра; x — смещение свободного конца цилиндра (Нецветов, Суслова, 2009).

Биомеханические исследования. Продольный модуль упругости (MOE) древесных тканей определяли по величине изгиба цилиндра обрезанной ветви (рис. 2), горизонтально зажатой в тисках, в ответ на приложение силы F на ее свободном конце по формуле (1) (Нецветов, Суслова, 2009; Корниенко и др., 2018):

$$MOE = \frac{64Cl^3}{3\pi d^4}, \quad (1)$$

где C — жесткость цилиндра, l — его длина, d — диаметр.

Жесткость зажатого одним концом цилиндра рассчитывали как (2):

$$C = \frac{mg}{x}, \quad (2)$$

где m — масса приложенного груза, g — ускорение силы тяжести, x — смещение свободного конца цилиндра.

Температурная зависимость модуля упругости. Для определения температурной зависимости модуля упругости (MOE) одновозрастные побеги отбирали при отрицательной температуре в среднем 3°C . С одного торца в образцы помещали хромель-алюмелевую термопару на глубину 1 см. Для предотвращения испарения оба торца покрывали герметическим материалом (силиконовый герметик). Затем образцы охлаждали в морозильной камере до $-22^\circ\text{C}/-21^\circ\text{C}$, после чего их переносили в лабораторию с температурой воздуха $+15^\circ\text{C}$. Исследуемый побег закрепляли в штативе концом, в торце которого была фиксирована термопара. Измерение продольного модуля упругости (MOE) проводили через каждый 1°C . Длительность эксперимента для образца в среднем составляла 1700 ± 200 с. Было исследовано 20 образцов. Для удобства сравнения данных по разным образцам их модули упругости нормировали к значениям, полученным при $T = +15^\circ\text{C}$.

Механическая устойчивость древесных растений. Для оценки механической устойчивости деревьев можжевельника виргинского использовали следующие параметры:

1. Относительное сопротивление изгибу (Niklas, Spatz, 2010):

$$RRB = \frac{r^2 MOE}{4\rho}, \quad (3)$$

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

2. Сопротивление древесного ствола растения или его скелетных ветвей изгибу при действии динамических или статических нагрузок. Параметр отражает способность растений выдерживать нагрузки и определяется произведением модуля упругости (MOE , формула 1) и второго момента сечения ($I = \frac{\pi r^4}{4}$, r — радиус,) ствола (Tropical Tree Physiology, 2016).

$$\text{Сопротивление изгибу} = EI. \quad (4)$$

3. Критическая масса (m_{cr}). Параметр отражает конкретные значения массы (кг), при действии которой ствол древесного растения или его скелетные ветви начинают деформироваться или обламываться при действии ветровых или гравитационных нагрузок (Niklas, Spatz, 2010).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 MOE I}{2l^2}, \quad (5)$$

$$m_{cr} = \frac{P_{cr}}{g}, \quad (6)$$

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

Статистическая обработка данных. Для статистической обработки данных использовали программы Statistica 8 (StatSoft Inc.) и Excel 2010 (Microsoft Corporation). Достоверность отличий средних значений определяли с использованием t -критерия Стьюдента. Зависимость критической массы (m_{cr}), жесткости на изгиб (EI), а также относительного сопротивления изгибу (RRB) от коэффициента d/l и диаметра ствола для исследуемых куртин можжевельника виргинского устанавливали с использованием степенной регрессионной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биомеханические исследования можжевельника виргинского. Плотность древесных тканей в условиях Донецка составляет 1045 ± 68 кг м⁻³ при абсолютной влажности древесины $84.7 \pm 9.1\%$.

Модуль упругости в зависимости от температурного фактора равен 5.22 ± 0.75 ГН м⁻² ($t = -18^\circ\text{C}$), 3.87 ± 0.61 ГН м⁻² ($t = +15^\circ\text{C}$) и 3.10 ± 0.87 ГН м⁻² ($t = +35^\circ\text{C}$) в условиях Донецкого ботанического сада. Различия показателей биомеханических параметров достоверны при $p < 0.05$.

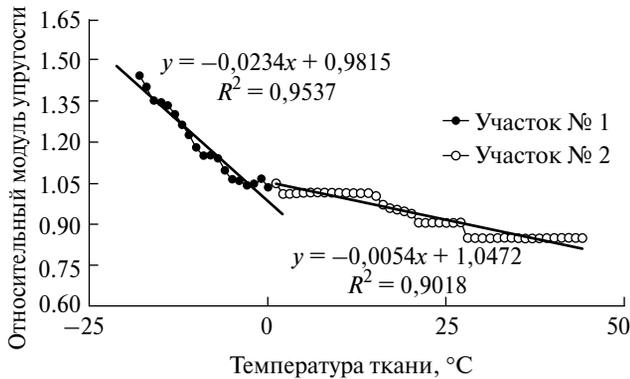


Рис. 3. Температурная зависимость модуля упругости для всех исследуемых образцов можжевельника виргинского.

Примечание. Каждое значение $MOE(T)$ нормировано к MOE_{+15} .

Влияние температуры на МОЕ древесных тканей можжевельника виргинского *in vitro* (лабораторные исследования). Зависимость MOE от температуры в общем виде для всех образцов имеет тенденцию к нелинейному падению при повышении температуры от -18°C до $+44^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). На кривой $MOE(T)$ определяются два участка с различным углом наклона. Первый участок располагается в диапазоне от -18° до 0°C , а второй участок — от $+1^{\circ}$ до $+44^{\circ}\text{C}$. Полученные значения наклона аппроксимирующей прямой свидетельствуют о том, что на протяжении обозначенного температурного диапазона относительное значение модуля упругости в среднем с каждым градусом уменьшалось для участка № 1 на 0.023, а для участка № 2 — на 0.005. Крутизна кривой $MOE(T)$ снижается по мере падения скорости роста температуры образцов. Разница в углах наклона на двух участках связана с тем, что в нашем эксперименте температура образцов не оставалась постоянной, к тому же изменялась

и скорость ее роста. Так, она падала по мере приближения к комнатной температуре.

Наличие градиента температур между древесиной и окружающим воздухом приводит к скачкообразным изменениям модуля упругости. Соответственно, такое изменение физико-механических свойств древесины может отражаться на жесткости скелетных ветвей и на углах их отхождения от ствола, т.е. на архитектонике кроны. Изменение модуля упругости скачками при быстром нагреве, очевидно, связано с неравномерным во времени таянием 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.

Влияние температуры на механическую устойчивость древесных растений можжевельника виргинского. Значение модуля упругости, а следовательно, и механическая устойчивость тесно связаны с температурой среды. Наиболее опасными являются даже не переходы из сезона с отрицательными температурами к сезону с положительными температурами, а временные резкие скачки температуры и в целом изменение климата внутри сезона.

На территории проведения эксперимента отмечались следующие природно-климатические условия, действие которых на древостои можжевельника виргинского мы объясним ниже с позиций биомеханики на основе собственных данных математического моделирования:

- после постепенного снижения температуры до отрицательных значений и перехода растений в состояние покоя наступал период длительного потепления уже в течение зимнего сезона;
- затем в течение короткого промежутка времени резко изменялись климатические условия: температура воздуха опускалась до значений -20°C и выпадали обильные осадки;

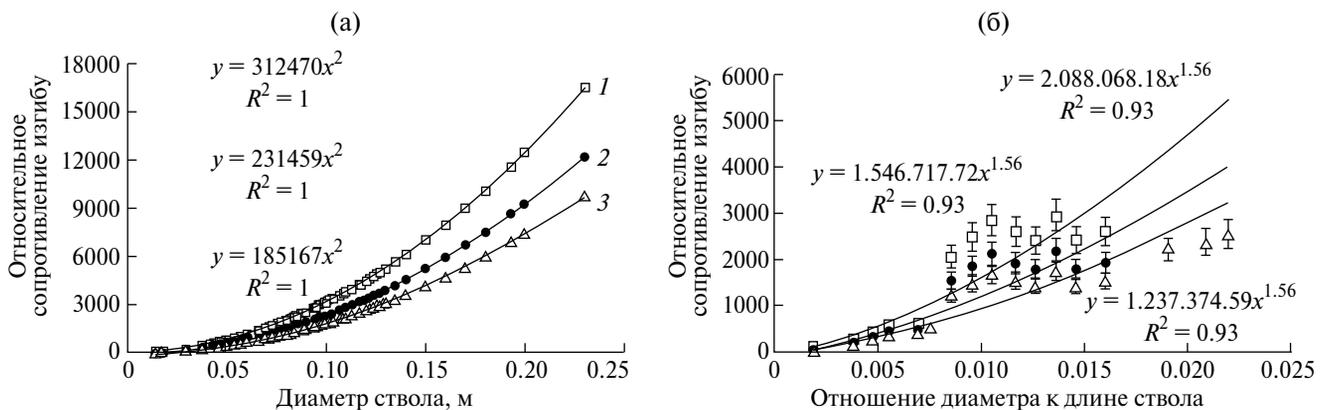


Рис. 4. Зависимость относительного сопротивления изгибу от диаметра ствола (а) и морфометрического маркера устойчивости (б) в условиях действия экологического фактора (температура окружающей среды).

Примечание. Моделирование производилось в зимний сезон при температуре -18°C (1), при ускоренном оттаивании $T = +12^{\circ}\text{C}$ (3) и в летний сезон при $T = +15^{\circ}\text{C}$ (2).

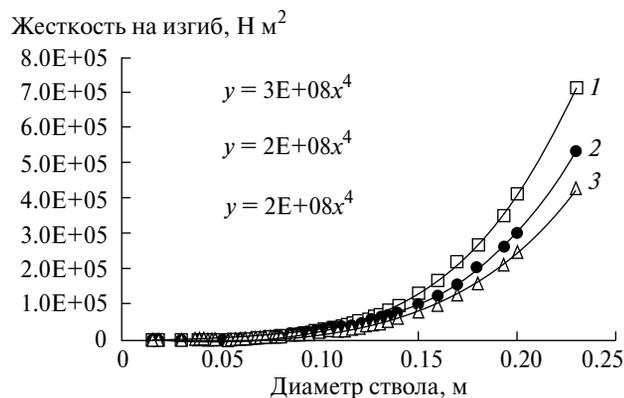


Рис. 5. Зависимость жесткости на изгиб от диаметра ствола в условиях действия экологического фактора (температура окружающей среды).

Примечание. Моделирование производилось в зимний сезон при температуре -18°C (1), при ускоренном оттаивании $T = +12^{\circ}\text{C}$ (3) и в летний сезон при $T = +15^{\circ}\text{C}$ (2).

· в течение нескольких часов падал мокрый снег, затем он перерастал в снежную бурю (snow storm) и ледяной шторм (ice storm), одновременно фиксировали порывы ветра до 15–20 м/с.

Параметр механической устойчивости — относительное сопротивление изгибу RRB (формула 3) прямо зависит от модуля упругости. Поскольку с утолщением ствола в радиальном направлении значения параметра изменяются в квадратичной зависимости (рис. 4, а), перепады температур в большей мере повлияют на устойчивость деревьев с минимальным отношением диаметра ствола к его высоте (рис. 4, б). Так, с наименьшим запасом прочности ствола выявлены растения со значением отношения d (диаметр) к l (длина) менее 0.015 (рис. 4, б). Для таких деревьев коэффициент эластичности степенной регрессии в среднем составлял 1.56. Физический смысл полученного значения состоит в том, что при увеличении отношения диаметра ствола к его высоте на 1% значение относительного сопротивления изгибу увеличится на 1.56%.

При оценке влияния экологического фактора (T , $^{\circ}\text{C}$) на древесности можжевельника виргинского необходимо отметить, что риску необратимых изгибов подвержены растения при ускоренном оттаивании в зимний период (рис. 4, уравнение регрессии № 3). Потеря прочности при этом составляет $\approx 40\%$. Это значение отражает изменение устойчивости дерева к механическим нагрузкам, но не дает точного значения критической массы жесткости ствола на изгиб или размеров растения, при которых происходит необратимое искривление или облом ствола. С этой целью можно использовать расчетные значения жесткости на изгиб (EI) и критической массы (m_{cr}) ствола древесного растения.

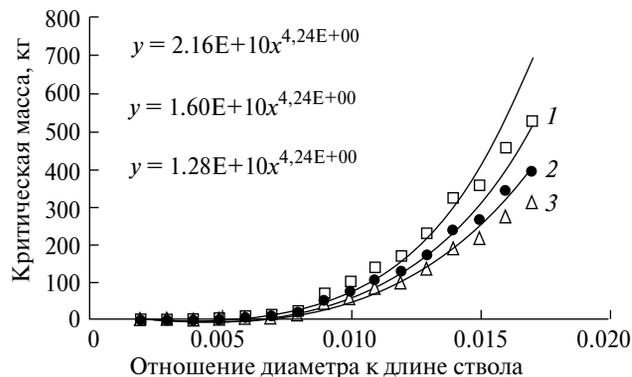


Рис. 6. Зависимость критической массы (m_{cr}) от отношения диаметра ствола (d) к его длине (l) в условиях действия экологического фактора (температура окружающей среды).

Примечание. Моделирование производилось в зимний сезон при температуре -18°C (1), при ускоренном оттаивании $T = +12^{\circ}\text{C}$ (3) и в летний сезон при $T = +15^{\circ}\text{C}$ (2).

Для можжевельника виргинского отношение жесткости на изгиб к диаметру имеет степенную зависимость ($R^2 = 0.99$). При оттаивании EI уменьшается на 38–41%. Для деревьев низшего класса жизненных состояний (классификация Г. Крафта) при $d < 0.007$ значения EI в диапазоне 20–745 $\text{H}/\text{м}^2$ являются критическими, что при сочетанном действии с природно-климатическими факторами окружающей среды может вызвать потерю механической устойчивости растения и привести к необратимой деформации стволов (рис. 5).

Критическая масса (m_{cr}), являясь параметром механической устойчивости, дает точные значения, при действии которых произойдут необратимые изменения/облом ствола (рис. 6). Для стволов деревьев можжевельника виргинского при значении d/l в диапазоне от 0.009 до 0.011 критическая масса варьирует в пределах от 70 до 141 кг при температуре окружающей среды -18°C (позиция № 1 на рис. 6), при оттаивании древесины в зимний период значения критической массы снижаются до диапазона 42–84 кг (позиция № 3 на рис. 6) при тех же значениях отношения диаметра ствола (d) к его длине (l). С увеличением отношения d/l критическая масса растет в степенной зависимости ($R^2 = 0.98$) и уже при $d/l > 0.02$ имеет значения выше 10^3 кг.

Вышеописанные расчетные зависимости механической устойчивости стволов деревьев можжевельника виргинского справедливы для нормально развитых растений с неизменной архитектоникой кроны. *In situ* в результате потери упругости скелетных ветвей (для наших наблюдений это 2017–2018 гг.) изменяется угол их прикрепления к стволу (в контрольных куртинах можжевельника виргинского при действии статических нагрузок углы отклонения стволов от вертикали составляли не более $7^{\circ} \pm 3^{\circ}$ (норма), в экспериментальных —

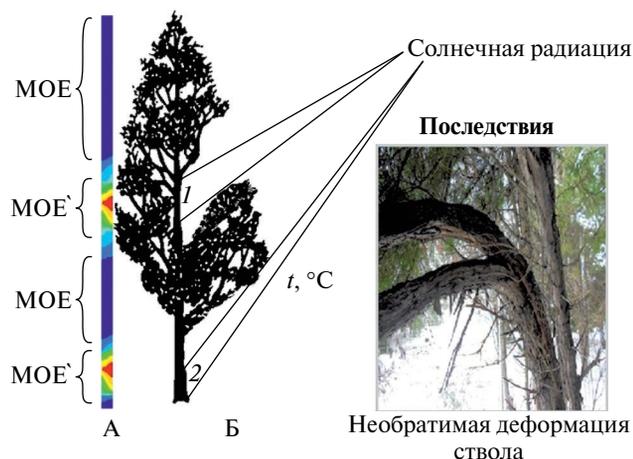


Рис. 7. Теоретическая схема, отражающая влияние локальных нагревов ствола на механическую устойчивость растения в целом.

Примечание. 1 — происходит прогрев средней части ствола; 2 — прогрев в области корневой шейки; А — внутри древостоя; Б — открытое пространство.

$42.4^\circ \pm 20.0^\circ$) и образуются внутрикронные разрывы. Происходит неравномерный прогрев ствола лучами солнца, критическое значение данного явления наиболее показательно в зимний период. В результате неоднородного прогрева ствола (рис. 7) биологическая система по физико-механическим свойствам тканей становится гетерогенной:

а) прогретая часть ствола функционирует в области упругой деформации (в тканях находится талая свободная вода и кластеры льда, модуль упругости при этом имеет максимальную скорость падения);

б) замороженная часть ствола (в основном верхняя) представляет собой биомассу (с учетом наледи

и снегового покрова), которая искусственно повышает критическую нагрузку на ствол и значительно снижает m_{cr} .

В результате проведения исследований *in situ* мы подтвердили данное теоретическое предположение и выделили несколько вариантов потери механической устойчивости в древостоях можжевельника виргинского:

1 — облом ствола происходит на высоте в среднем 1.5 ± 0.5 м (рис. 8, а). Позиция 1 на рис. 7.

2 — облом ствола или вывал растений можжевельника виргинского происходит в зоне корневой шейки (рис. 8, б). Позиция 2 на рис. 7.

Фитоактинометрические исследования. На протяжении периода исследований с 2017 по 2021 гг. в контрольных куртинах сомкнутость не изменилась и составила 1.0–0.8, при этом кроны относительно симметричны, меж- и внутрикронные разрывы в пологом встречаются редко, и, следовательно, освещенность под пологом более равномерная [19]. В среднем за весь период исследования среднее значение освещенности на затененных и освещенных участках под пологом не превышало 1013 ± 57 и 3420 ± 267 люкс соответственно.

В экспериментальных древостоях сомкнутость варьировала от 0.7–0.6 (2017 г., начало проведения исследований [19]) до изреженных древостоев (значение 0.4 состоянием на 2022 г., декабрь/январь). Кроны асимметричны и раскидисты от центра куртины наружу, что отражается на освещенности полога. В сравнении с открытым пространством, освещенность полога составляла $\approx 50\%$ (2017–2018 гг.) и до $\approx 65\%$ (2019–2021 гг.). При этом такие изменения освещенности влекли за собой изменение температуры и влажности почвы (табл. 1). Так, температура на поверхности почвы в экспериментальных куртинах была всего на 14% ниже ($32^\circ \pm 1^\circ\text{C}$),

(а)

(б)



Рис. 8. Потеря механической устойчивости стволов можжевельника виргинского (фото в дендрарии ДБС, Корниенко В.О., 2019 год).

Таблица 1. Значение температуры и влажности на разной глубине для исследуемых куртин можжевельника виргинского

Среда	Глубина забора, см	Контроль, °С	Эксперимент, °С	Открытое пространство, °С	Влажность	
					Эксп.	Контр.
Воздух	—	22 ± 1	32 ± 1**	37 ± 1	—	—
	5	20 ± 1	25 ± 1*	29 ± 1	dry ⁺	nor
Почва	10	17 ± 1	20 ± 1*	25 ± 1	dry/nor	wet/wet ⁺
	15	15 ± 1	18 ± 1	23 ± 1	wet	wet ⁺

* — различия с контролем достоверны (P < 0.05).

** — различия с контролем достоверны (P < 0.01).

чем на открытом пространстве ($37^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$), по сравнению с 41% в контроле ($22^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$). При глубине 5–15 см это значение максимально доходило до 22% (18°C). В связи с этим влажность почв также была нарушена. В древостоях с измененной архитектоникой кроны на глубине 5 см значение влажности было dry⁺ (сильно сухая), на глубине 10 см — dry/nor (нижняя граница нормальной влажности для этого среза) и на глубине 15 см — wet (почва была влажной). Усиленное поступление солнечной радиации и изменение в связи с этим температурного режима почвы и воздушной среды экспериментальных древостоев можжевельника виргинского обуславливают достаточные экологические условия для естественного развития подлеска и неизбежной трансформации фитоценоза.

В период наблюдений 2017–2021 гг. выявили, что в древостоях экспериментальных куртин подлесок более разнообразен и состоит из подростов древесных видов и более зрелых кустарниковых, наблюдается зарастание травянистой растительностью. С каждым годом экспериментальные куртины все больше подвергаются зарастанию девичьим виноградом пятилисточковым (*Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch. (до 45% состоянием на 2021 год), который оплетает взрослые растения и создает дополнительную статическую нагрузку на стволы можжевельника.

Под пологом контрольных куртин травянистая и древесно-кустарниковая растительность очень редкая, встречается единично жимолость татарская (*Lonicera tatarica* L.), изредка — птелея трехлистная (*Ptelea trifoliata* L.), а также девичий виноград пятилисточковый.

Способность искусственных насаждений можжевельника виргинского противостоять натиску агрессивной травянистой и древесно-кустарниковой растительности во многом определила их устойчивость, жизненное состояние и возможность дальнейшего развития. В контрольных куртинах основным естественным методом повышения устойчивости насаждений является создание под пологом насаждений теневых условий. В экспериментальных куртинах изменение фитоклимата повлекло за собой уменьшение их устойчивости

и, как следствие, зарастание травянистой и древесно-кустарниковой растительностью.

Жизнеспособность растений. По результатам проведения диагностики состояния и мониторинга жизнеспособности растений можжевельника виргинского в период 2017–2021 гг. и в начале 2022 г. гибель деревьев оценена в 16% от общего количества по сравнению с 2017 г. По шкале В.А. Алексеева соответственно свежего сухостоя (5а) было 3%, а старого (5б) — 13%, т.е. в экспериментальных насаждениях в среднем стабильно выпадает около 3% растений в год. Отмирающих деревьев, которые характеризуются разрушенной кроной с густотой не менее 15–20% по сравнению со здоровой и имеют около 70% сухих ветвей, насчитывали 7% в выборке (4 балла). Сильно поврежденные растения (3 балла) по состоянию на 2022 г. составляли 21%. Поврежденных (ослабленных) деревьев можжевельника виргинского (2 балла) в исследованных куртинах было 56%. Это растения, у которых снижена густота кроны на 30% вследствие мертвых или усыхающих ветвей, в том числе и в верхней трети ствола растения, и наблюдается выключение из ассимиляционной деятельности $\approx 30\%$ листовой поверхности.

Прогноз — выпадение коллекции можжевельника виргинского на территории дендрария Донецкого ботанического сада в течение 10 лет без возможности самовосстановления фитоценоза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При высокой положительной температуре в летний период снижение модуля упругости приводит к медленным изгибам скелетных ветвей, что, в свою очередь, отражается на площади проекции кроны, а также на ее светопроницаемости и, как следствие, на температуре и влажности под пологом. В первую очередь она будет сказываться на механической устойчивости деревьев, которые характеризуются критическим отношением диаметра ствола к его длине (коэффициент $d/l \leq 0.009$) и наименьшим запасом прочности ствола ($RRB < 1500$, $EI < 2010$ ГН м², $m_{cr} < 50$ кг).

2. Согласно разработанной схеме механической устойчивости можжевельника виргинского,

вследствие появления разрывов и в целом изменения архитектоники кроны, происходит неравномерный прогрев ствола, который приводит к нарушению его однородности по физико-механическим свойствам тканей. Выявлены необратимые деформации и многочисленные обломы растений на высоте в среднем 1.5 ± 0.5 м и в зоне корневой шейки. В результате в изученных степных лесонасаждениях нарушается световой режим (увеличивается на 50–65%), влияющий на повышение температуры воздуха внутри древостоев (на 10°C), что ведет к нарушению влажности и температуры почвы.

3. Изменение фитолимата под пологом в сторону повышенной освещенности из-за изменения архитектоники приводит к снижению устойчивости и, как следствие, неспособности древесных растений сопротивляться натиску агрессивной травянистой и древесно-кустарниковой растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
- Бельгард А.Л. Степное лесоведение. М.: Лесная промышленность, 1971. 336 с.
- Иванько И.А. Экологическая роль световой структуры в формировании лесных культурбиогеоценозов в степи (средообразование, сylvатизация, устойчивость): дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Днепропетровск: Днепропетров. нац. ун-т, 2002. 239 с.
- Козловский Б.Л., Огородникова Т.К., Куропятников М.В., Федоринова О.И. Ассортимент древесных растений для зеленого строительства в Ростовской области. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2009. 416 с.
- Корниенко В.О., Калаев В.Н. Экологическое значение биомеханических свойств древесных растений на примере *Juniperus virginiana* L. // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 1. С. 97–103.
- Корниенко В.О., Калаев В.Н. Влияние природно-климатических факторов на механическую устойчивость и аварийность деревьев березы повислой в г. Донецке // Лесоведение. 2022. № 3. С. 321–334.
- Корниенко В.О., Калаев В.Н., Елизаров А.О. Влияние температуры на биомеханические свойства древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта // Сибирский лесной журнал. 2018. № 6. С. 91–102.
- Нецветов М.В. Влияние ветра на освещенность подпологового пространства *Acer saccharinum* L. и *Acer pseudoplatanus* L. // Украинский ботанический журнал. 2012. Т. 69. № 1. С. 46–53.
- Нецветов М.В., Сулова Е.П. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам // Промышленная ботаника. 2009. Вып. 9. С. 60–67.
- 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.
- 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. № 3. P. 89–106.
- James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A. Tree biomechanics literature review: dynamics // Arboriculture & Urban Forestry. 2014. V. 40. № 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. № 10. P. 1522–1530.
- Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywiński W., Kopaczek J., Klimek K. The biomechanical formation of trees // Drewno. 2019. V. 62. № 204. P. 5–22.
- Niklas K.J., Spatz H.C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density // American Journal of Botany. 2010. V. 97. № 10. P. 1587–1594.
- Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrangé 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. № 7. P. 1163–1173.
- Tropical Tree Physiology. Adaptations and Responses in a Changing Environment / G. Goldstein, L.S. Santiago (Eds.). Springer, 2016. V. 6. 467 p.

Mechanical Stability of Virginian Juniper Trees in Steppe Zone of the Eastern-European Plain

V. O. Kornienko¹*, V. N. Kalaev²

¹Donetsk State University, Universitetskaya st., 24, Donetsk, 83001, Russian Federation.

²Voronezh State University, Universitetskaya sq. 1, Voronezh, 394018 Russian Federation.

*E-mail: kornienkovo@mail.ru

The paper establishes a relationship between the temperature factor, a physico-mechanical parameter — the modulus of elasticity of the Virginian juniper (*Juniperus virginiana* L.) wood tissues and its crown architectonics. Thus, with high positive temperatures in summer, a decrease in the elastic modulus leads to slow bending of the skeletal branches, which, in turn, affects the crown projection area, as well as its light permeability and, as a result, the temperature and humidity under the canopy. First of all, the

temperature will affect the mechanical stability of trees, which is characterised by a critical ratio of the trunk diameter to its length (coefficient $d/l \leq 0.009$) and the lowest range of the trunk's resilience. The article developed a scheme for the mechanical stability of the Virginian juniper — due to the appearance of gaps and, in general, changes in the architectonics of the crown, uneven heating of the trunk occurs, which leads to a disruption of its uniformity in terms of the physico-mechanical properties of tissues. Irreversible deformations and numerous trunk breakages were revealed at an average height of 1.5 ± 0.5 m and in the root collar zone. As a result, the light regime of the forest stand is disturbed, which affects the phytoclimatic and bioecological features of the forest steppe plantations. A change in the phytoclimate under the canopy towards increased illumination due to a change in architectonics leads to a decrease in stability and, as a result, the inability of woody plants to resist the pressure of aggressive herbaceous and tree-shrub vegetation.

Keywords: Virginian juniper, forest stands, temperature, mechanical stability, vitality, damage.

Acknowledgements: The study has been carried out within the framework of a youth laboratory project “Diagnostics and adaptation mechanisms of natural and anthropogenically transformed ecosystems of Donbas” (No. 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12)

REFERENCES

- Alekseev V.A., Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev (Diagnostics of vitality of trees and stands), *Lesovedenie*, 1989, No. 4, pp. 51–57.
- Bel'gard A.L., *Stepnoe lesovedenie* (Steppe forestry), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1971, 336 p.
- 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.
- 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, No. 3, pp. 89–106.
- Ivan'ko I.A., *Ekologicheskaya rol' svetovoi struktury v formirovaniy lesnykh kul'turbiogeotsenozov v stepi (sredopreobrazovanie, sil'vatizatsiya, ustoichivost')*. Diss. kand. biol. nauk (The ecological role of light structure in the formation of forest cultures of biogeocenoses in the steppe (environment transformation, sylvatization, stability). Candidate's biol. sci. thesis), Dnepropetrovsk: Dnepropetrov. nats. un-t, 2002, 239 p.
- James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A., Tree biomechanics literature review: dynamics, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2014, Vol. 40, No. 1, pp. 1–15.
- James K.R., Haritos N., Ades P.K., Mechanical stability of trees under dynamic loads, *American Journal of Botany*, 2006, Vol. 93, No. 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.
- Kornienko V.O., Kalaev V.N., Ekologicheskoe znachenie biomekhanicheskikh svoystv drevesnykh rastenii na primere *Juniperus virginiana* L. (The ecological significance of the biomechanical properties of woody plants on the example of *Juniperus virginiana* L.), *Vestnik VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2018, No. 1, pp. 97–103.
- Kornienko V.O., Kalaev V.N., Elizarov A.O., Vliyanie temperatury na biomekhanicheskie svoystva 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., Vliyanie prirodno-klimaticheskikh faktorov na mekhanicheskuyu ustoichivost' i avariynost' derev'ev berezy povisloi v g. Donetske (The impact of natural climatic factors on a mechanical stability and accident proneness of the silver birch trees in Donetsk city), *Lesovedenie*, 2022, No. 3, pp. 321–334.
- Kozlovskii B.L., Ogorodnikova T.K., Kuropyatnikov M.V., Fedorinova O.I., *Assortiment drevesnykh rastenii dlya zelenogo stroitel'stva v Rostovskoi oblasti* (Assortment of woody plants for green construction in the Rostov region), Rostov-na-Donu: YuFU, 2009, 416 p.
- Netsvetov M.V., Suslova E.P., Mekhanicheskaya ustoichivost' derev'ev i kustarnikov k vibratsionnym nagruzkam (Mechanical stability of trees and shrubs under vibration loads), *Promyshlennaya botanika*, 2009, No. 9, pp. 60–67.
- Netsvetov M.V., Vliyanie vetra na osveshchennost' podpologovogo prostranstva *Acer saccharinum* L. i *Acer pseudoplatanus* L. (Influence of wind on the illumination of the subsoil space of *Acer saccharinum* L. and *Acer pseudoplatanus* L.), *Ukrainskii botanicheskii zhurnal*, 2012, Vol. 69, No. 1, pp. 46–53.
- Niklas K.J., Spatz H.C., Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density, *American Journal of Botany*, 2010, Vol. 97, No. 10, pp. 1587–1594.
- Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrance 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, No. 7, pp. 1163–1173.
- Tropical Tree Physiology. Adaptations and Responses in a Changing Environment*, Springer, 2016, Vol. 6. 467 p.