

УДК 577.3
PACS number(s): 43.40.Ng

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДЕРЕВ ДО ВІБРАЦІЙ

В. Корнієнко, М. Нецветов, В. Нікуліна, О. Суслова

*Донецький національний університет
вул. Університетська, 24, 83055 Донецьк, Україна
e-mail: max@dongu.donetsk.ua*

Дослідили поширення вібрацій на дерево та їхнє згасання на ньому. Викликали пружні хвилі на ґрунті ударником та реєстрували на різній відстані як на самому ґрунті, так і на дереві. Сигнал обробляли методом швидкого перетворення Фур'є і отримували амплітудні спектри, які порівнювали між собою та зі спектрами вібрацій ґрунту і дерев від руху транспорту. В ході досліджень визначили найстійкіші дії вібрації від руху транспорту дерева.

Ключові слова: вібрації, дерева, платан східний, псевдоцуга, магнолія суланжа, дуб червоний.

В умовах сучасного міста рух автомобільного та залізничного транспорту призводить до вібрацій ґрунту, що поширюються на дерева придорожніх зелених смуг [1]. Особливістю вібрацій транспортного походження є їхня тривалість у часі, регулярність, а також поєднання з хімічними забруднювачами ґрунту та повітря. Отож, збільшення інтенсивності транспортних потоків неминуче призводить до посилення поєданого впливу на флору хімічними речовинами та вібрацією [2]. З огляду на це постають питання щодо наявності та інтенсивності вібраційного впливу транспорту на дерева. Одним із задач, що їх потрібно вирішити, є дослідження відносної стійкості дерев різних видів до вібрацій, що передаються їм від ґрунту.

Експерименти завершальної серії проводили за такою схемою:

1. Вимірювання загасання сейсмічного сигналу на ґрунті у безпосередній близькості від досліджуваного дерева. Виміри амплітуди сигналу проводили на відстані 15, 35, 50, 70, 85, 100 см від місця збурення. Пружне збурення здійснювали за допомогою ударника. На відстані 70 см сигнал записувався для побудови спектрів потужності методом швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) з метою визначення домінуючих частот вібрації.

2. Вимірювали амплітуди вібрації на стовбурі дерева на висоті 50 см, що була спричинена збуренням на ґрунті в 70 см від стовбура по периметру кола. Визначали місце на ґрунті, збурення в якому зумовлювали максимальні за амплітудою вібрації на стовбурі. Реєстрували сигнал для подальшої обробки ШПФ.

На рис. 1 показано загасання вібраційного сигналу на ґрунті з різних ділянок. Як бачимо, значення амплітуд вібрацій варіюють у досить широких межах. Зокрема, на відстані 70 см від місця збурення, яке відповідає дистанції від місця удару до стовбура дерева у другій серії, амплітуда змінювалася від 1,25 до 6,07 одиниць. У зв'язку з цим для об'єктивності оцінки сприйнятливості дерев різних видів до вібрацій значення

амплітуд коливань стовбурів відносили до амплітуди коливання ґрунту на відстані 70 см від місця збурення пружної хвилі. Частоти, на яких відбувається розповсюдження вібрацій ґрунтом розміщені у діапазоні до 100 Гц (рис. 2).

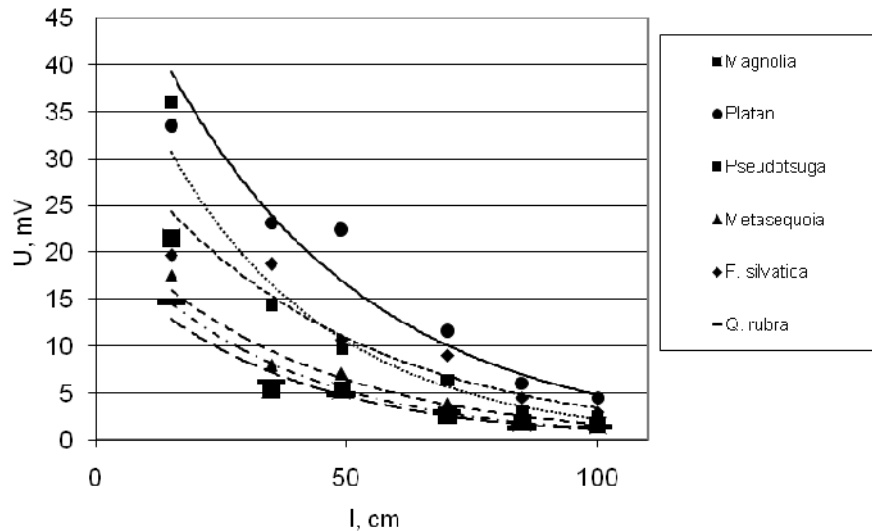


Рис. 1. Загасання вібрації з відстанню від джерела пружного збурення

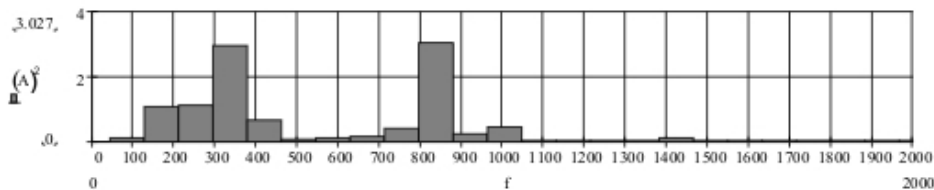


Рис. 2. Спектр потужності вібрації ґрунту від пружного збурення. A^2 – квадрат амплітуди, f – частота

Основні результати досліджень, що були проведені, наведені в табл. 1. Види дерев у таблиці розташовані у порядку зростання відносної амплітуди коливань a_3 – головний критерій оцінки. Як бачимо з таблиці, видів дерев з мінімальними амплітудами вібрації, тобто тими, що становлять не більше 10% від амплітуди вібрації ґрунту, всього чотири з 22-х досліджених. До них належать платан, дуб червоний, щеплення ялини повислі і псевдоцуга. Проте потрібно враховувати і амплітуду вібрації стовбура при збуренні, викликаному на ньому ж. За цим параметром ялина повисла значно поступається деревам інших видів. Серед вивчених дерев зі значенням відносної амплітуди 0,1–0,2 (тобто 10–20% від вібрації ґрунту) опинилася лише магнолія суланжа. У неї також невисокий показник a_3 .

Ще один важливий критерій оцінення вібраційної стійкості – неспівпадання основних частот вібрацій дерев і ґрунту. У цьому сенсі найпривабливішим є дуб червоний, частоти вібрацій якого сягають далеко за діапазон 1–100 Гц (рис. 3). Основні

частоти вібрацій платана, псевдоцуги і магнолії також є за межами частот ґрунту від руху транспорту.

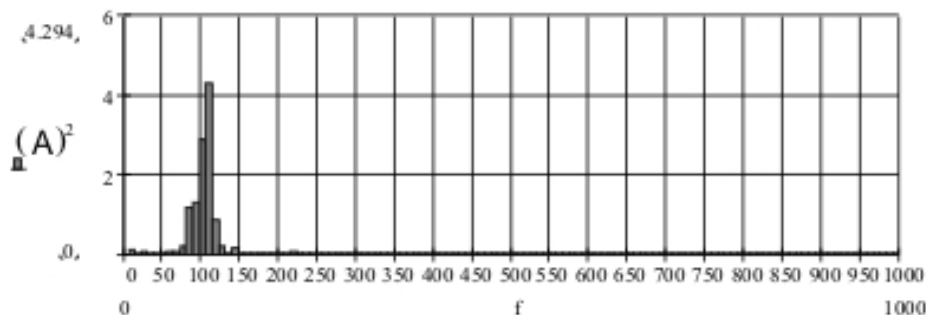


Рис. 3. Спектр потужності вібрації дуба червоного від пружного збурення. A^2 – квадрат амплітуди (a_3), f – частота

Таблиця 1

Значення амплітуд і домінуючих частот вібрацій дерев у різних експериментальних серіях

№	дерево	a_1 , мВ		a_2 , о.е.	a_3 , мВ		f_3 , Гц	
		М	$\pm m$		М	$\pm m$	М	$\pm m$
1	Platanus	0,4	0,14	0,035	0,82	0,366	430	15
2	Q. rubra	0,14	0,104	0,049	0,41	0,202	850	50
3	Picea 3 k 3 inversa	0,29	0,137	0,05	4,6	1,63	110	5
4	Pseudotsuga	0,48	0,183	0,075	1,57	0,399	285	10
5	M. soulanjeana	0,5	0,34	0,19	2,98	1,009	270	10
6	Pinus flexilis	1,53	0,266	0,22	45,3	2,77	75	3
7	A. ibericum	0,35	0,206	0,23	2,11	0,97	185	5
8	Fagus	2,35	0,875	0,26	3,6	1,43	145	5
9	Larix	3,64	0,631	0,27	5,85	1,157	60	5
10	Picea 2 k 2	2,15	0,814	0,27	46,4	6,09	125	5
11	J. nigra	2,08	0,31	0,31	7,8	2,96	30 200	5
12	C. submolis	3,45	0,317	0,516	2,7	0,97	70 330	10 5
13	G. biloba	5,19	0,995	0,55	13,7	4,2	150	5
14	Metasequoia	1,08	0,29	0,83	3,2	1,88	100	5
15	Picea k5 nidiformis	3,45	0,657	0,89	37	3,21	50	10
16	Q. robur	2,7	0,92	0,92	3,55	0,71	30 150	10 5
17	Picea 2 k 3	2,7	0,82	0,93	30,3	9,39	75	10
18	Liriodendron	2,18	0,735	1,0	5,7	2,61	130	10
19	Pinus ponderosa	9,59	2,980	1,0	35	11,1	120	10
20	Picea 1 k 1 nidiformis	272	95,1	1,0	12,7	2,60	63	4
21	Picea 1 k 3	3,92	1,131	1,0	23,7	6,4	117	5
22	Taxus	6,0	2,05	1,0	16,0	6,75	160	10

a_1 – амплітуда вібрацій, переданих від ґрунту

a_2 – відносна амплітуда вібрацій дерева

a_3 – амплітуда вібрацій, збуджених на дереві

Дерева інших видів (див. табл. 1), мають параметри, менш сприятливі для стійкості до вібрацій транспорту. При формуванні складу дерев першої смуги варто також враховувати і діаметр стовбура висаджуваного дерева. Так, дерева, що росли в розсаднику в умовах дефіциту світла, мають менш щільну деревину, оскільки в ній більше повітряних порожнин – провідних пучків на одиницю площі об'єму. Ця закономірність відображена на рис. 3.

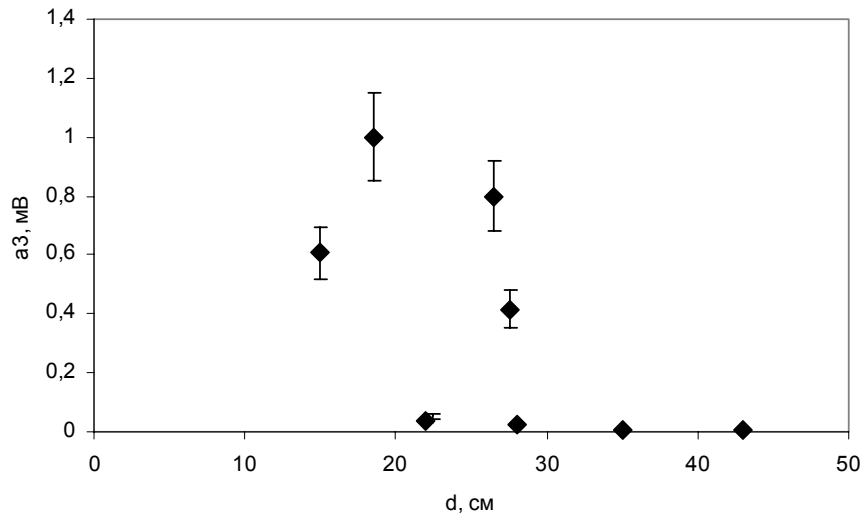


Рис. 3. Амплітуди вібрації дубів червоного одного віку залежно від діаметра стовбура

Ще одним важливим критерієм у виборі порід, стійких до вібрації, є товщина кори та її морфологічні особливості. У доміантних дерев дуба червоного товщина кори на висоті 50 см становить більше ніж 1,5 см, вона щільно і рівномірно покриває стовбур. В експерименті ми звільнили площу 1,5x1,5 см від кори на висоті 50 см і біля основи. Як наслідок було виявлено, що під час удару об голий стовбур і реєстрації коливань на голому стовбурі дуба червоного амплітуда зростає від 0,1 до 1,2 одиниць. У ведмедячого горіха кора у вигляді чешок, верхні її шари не щільно прилягають до нижніх і фактично є демпферами (пом'якшувачами вібрацій). В експерименті ми провели дві серії дослідів: у першому вимірювали вібрації на верхніх шарах кори, у другому – під час їх зняття на глибших шарах. Було з'ясовано, що амплітуда сигналу змінюється від 0,1–0,6 одиниць за наявності верхніх шарів кори до 1,7–1,9 без них.

Зазначимо, що щільність деревини залежить великою мірою і від виду дерева. Дерева з більшою щільністю мають більшу стійкість до вібрацій. Це стає ясно з таких міркувань.

У природі дія вітру, дощу та деяких інших явищ призводять до виникнення і розповсюдження по рослинах пружних хвиль (або вібрацій). Можна вказати два механізми виникнення вібрацій рослин унаслідок дії вітру. По-перше, відхилення і розгойдування листя, гілок і стовбура в місцях їхнього вигину і відгалуження/закріплення спричинюють пружні деформації, які зумовлюють появу пружної хвилі. Вібрації індукуються також у разі тертя і зіткнення гілок і листя. По-друге, за певної швидкості вітру внаслідок несиметричності відриву потоку повітря від поверхні частин рослин вони також починають вібрувати. Підкреслимо, що в першому

випадку частота вібрації не залежить від сили вітру, а у другому вона пов'язана з нею прямо пропорційно:

$$f = \text{Sh} \cdot \frac{v}{d},$$

де $\text{Sh} = 0,2$ – число Струхалю, v – швидкість вітру та d – діаметр обтічного січення.

Як бачимо з формули, елементи дерева з малим діаметром вібруватимуть з великими частотами за наявності вітру однакової швидкості. Зокрема, вже при швидкості 5 м/с невеликі гілочки і черешки листя вібруватимуть з частотами в чутному діапазоні.

У разі ж вібрації, що індукується вигинами частин рослин, частота визначається швидкістю розповсюдження пружної хвилі в деревних волокнинах:

$$f = \frac{v}{\lambda}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі. Своєю чергою, швидкість розповсюдження звуку в середовищі визначається модулем пружності E та щільністю:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2)$$

Наявність неоднорідностей у волокнинах рослин зумовлює явища дифракції, інтерференції і, як результат, наявність декількох частот вібрацій. В умовах міста пружні хвилі, зумовлені різними причинами, поширюються на рослини. Тут від ґрунту передається частина енергії вібрацій, яка визначається квадратом відношення різниці хвильових опорів до їх суми, – коефіцієнтом віддзеркалення пружної хвилі:

$$C = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (3)$$

Хвильовий опір – добуток швидкості пружної хвилі в середовищі та її щільності:

$$Z = v \rho. \quad (4)$$

Або з (2):

$$Z = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \rho. \quad (5)$$

З виразу (4) доходимо висновку, що коефіцієнт віддзеркалення буде нижчий при близьких значеннях хвильових опорів двох середовищ, а отже, і частина енергії, передана від ґрунту дереву, буде вища, ніж при Z_1 і Z_2 , що суттєво відрізняються. Оскільки щільність і модуль пружності залежать від вологості, то, як видно з (5), при цьому змінюватиметься і хвильовий опір. Для гілок одного і того ж дерева щільність, модуль пружності і хвильовий опір значно варіюють (табл. 2 (E і ρ – зміряні, v і Z – розраховані)). Мінімальне значення імпедансу є характерним для сухої гілки, при цьому його максимальне значення – вище майже удвічі.

Таблиця 2

Значення хвильового імпедансу дуба черешчатого за різних значень щільності, модуля пружності і швидкості пружної хвилі

№	ρ , кг/м ³	$E \cdot 10^9$, Н/м ²	v , м/с	$Z \cdot 10^3$, Па·с/м
1*	560	1,3	1523,6	853,2
2	980	1,2	1106,6	1084,4
3	980	1,3	1151,7	1128,7
4	940	2,6	1663,1	1563,3
5	940	2,7	1694,8	1593,1
6	940	2,9	17	1651,1

* – суха гілка.

Більшість ґрунтів, як відомо, мають щільність від 1000 до 1500 кг/м³. Швидкість розповсюдження звуку в ґрунтах змінюється головню від 85 до 180 м/с. Для визначення діапазону значень хвильового імпедансу ґрунту можна скористатися формулою (4). Результати розрахунків наведені у табл. 3 (жирним виділені значення, характерні для найпоширеніших v і ρ). Як видно з табл. 2 і 3, хвильові опори ґрунту і дерева відрізняються приблизно на порядок. На рис. 4 показані значення коефіцієнта пропускання, $1-C$, залежно від звукового опору ґрунту – для деревних волокон з різним співвідношенням щільності і модуля пружності він може досягати і перевищувати 50%.

Таблиця 3

Розраховані значення хвильового імпедансу (103, Па·с/м) ґрунту за різних значень щільності і швидкості пружної хвилі

v , м/с	ρ , кг/м ³					
	1000	1100	1200	1300	1400	1500
85	85	93,5	102	110,5	119	127,5
100	100	110	120	130	140	150
140	140	154	168	182	196	210
180	180	198	216	234	252	270
220	220	242	264	286	308	330
260	260	286	312	338	364	390
300	300	330	360	390	420	450

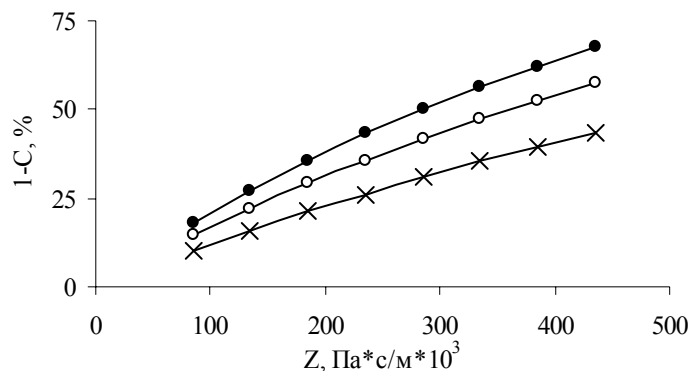


Рис. 4. Залежність коефіцієнта пропускання плоскої пружної хвилі на дерево з ґрунту від хвильового імпедансу ґрунту при різноманітних значеннях щільності та модуля пружності деревинних волокнин. Для №1 з таблиці 2 – ●; №2 – ○; №4 – X

На підставі загальновідомих формул можна оцінити передавану енергію коливань рослині від ґрунту. Проте, для більшої точності потрібно проводити вимірювання основних параметрів. Для рослин експериментальне вивчення модуля пружності складнощів не представляє, а для ґрунту його вимірювання є досить складним. Є декілька способів вимірювання модуля пружності, які для дорожніх і будівельних робіт регулюються ГОСТами 12248-96 і 20276-85. Модуль пружності ґрунту визначається за законом Гука як коефіцієнт відповідності між приростом навантаження σ на ґрунт і відповідною його деформацією ϵ :

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma.$$

Основна складність прямих вимірювань полягає у визначенні величини деформації ґрунту від навантаження, яке не викликає руйнування її структури. Модуль пружності можна обчислити за (2), знаючи щільність, яка легко визначається в лабораторних умовах, і швидкість звуку в ґрунті. Остання вимірюється в лабораторних або польових умовах, як відстань Δl , що була пройдена хвилею за час Δt . В лабораторних умовах доцільно застосовувати ультразвукові установки. У польових вимірюваннях можна обійтися лише двома передавачами і осцилоскопом. Опишемо використовуваний спосіб. Суть методу полягає у розташуванні двох передавачів і ударника на одній лінії. Відстань між ними має бути достатньою для розрізнення сигналів на екрані осцилоскопа. Приблизно оцінюючи швидкість в 100 м/с і знаючи тривалість сейсмічного сигналу, наприклад 10 мс, обчислимо, що для чіткого розділення сигналів відстань між передавачами має становити не менше одного метра, а ціна ділення осцилоскопа не більше 10 мс. Фіксується час між початком сигналів від кожного передавача. У наших дослідженнях ми використовували заздалегідь відкалібровані п'єзокристалічні передавачі. Оскільки сигнал, проходячи відстань більше метра, значно затухає, більш віддалений щодо ударника, передавач сполучали з осцилоскопом через підсилювач. Досліджували ґрунт у Донецькому ботанічному саду на ділянці з ведмежачим горіхом і у дворі біологічного факультету Донецького національного університету.

На обох ділянках спочатку дерева висаджували на чорнозем звичайний. Вологість ґрунту сягала не більше 10% від ваги у верхньому шарі (5 см) і до 50% на глибині

більше 25 див. Щільність – 1217 ± 2 і 1220 ± 2 кг/м³ у саду біофаку і ботанічного саду, відповідно.

На рис. 5 показано осцилограму вібрації, спричиненої ударом об ґрунт у саду біофаку ДонНУ. Стрілками позначений початок сигналу від першого і другого передавачів (відстань 2,2 м). Сигнали надходять один за одним через $20 \pm 0,5$ мс. Отже, швидкість звуку в ґрунті становить $110,0 \pm 2,75$ м/с. Аналогічно була обчислена швидкість звуку в ґрунті у Донецькому ботанічному саду, вона становила $96,9 \pm 4,1$ м/с. При зволоженні ґрунту до 80% швидкість знизилася до 62 ± 2 м/с.



Рис. 5. Вібрація ґрунту, спричинена ударом. Масштаб горизонтальної смуги – 10 мс

На основі вимірних значень швидкості звуку в ґрунті і її щільності за формулою (2) обчислюємо модуль пружності (модуль Юнга), він становив $13,993\text{--}15,516$ МН/м² у саду біофаку, $10,156\text{--}12,465$ МН/м² у ботанічному саду. При насиченні вологою ґрунту ботанічному саду Е сягнув $7,906\text{--}8,995$ МН/м². Значення хвильового імпедансу, обчислено за формулою (4), – $113,1\text{--}123,5 \cdot 10^3$ і $131,8\text{--}140,5 \cdot 10^3$ Па•с/м для сухого та насиченого вологою ґрунту, відповідно. Для ґрунту у саду біофаку – $130,4\text{--}137,5 \cdot 10^3$ Па•с/м. Такі значення імпедансу забезпечують передачу від $\sim 20 \pm 5$ % енергії вібрації від ґрунту деревам таких порід, як дуб черешчатий. Решта частини коливань відбиватиметься від частин дерева. Тобто зі збільшенням імпедансу дерева зменшується енергія вібрацій, що передається йому від ґрунту.

У разі відбирання видів дерев, найстійкіших до дії вібрацій від руху транспорту, потрібно враховувати, що такі особливості дерев мають першорядне значення:

1. Щільність деревини, із збільшенням якої знижується “сприйнятливість” дерева до вібрацій ґрунту. Тут важливо враховувати як видові відмінності, так і відмінності, пов’язані з умовою зростання саджанців.

2. Особливості будови кори та її товщина: збільшення товщини або верхні шари, що відшаровуються, знижують сприйнятливість вібрацій.

3. Характер кореневої системи: наявність великої кількості поверхневого коріння.

4. Після проведених вимірювань амплітуд вібрацій дерев різних видів (див. табл. 1) виявлені такі стійкі до вібрацій види:

- платан східний
- псевдоцуга
- магнолія суланжа
- дуб червоний

Особливу увагу варто звернути на те, що стійкість до вібрацій не є єдиною властивістю дерев, яка може забезпечити їм хороший ріст поблизу магістралей. Тому цей критерій необхідно враховувати спільно із стійкістю до забруднення ґрунту і повітря.

1. Никулина В.Н., Корниенко В.О., Роменский М.В., Нецветов М.В. Вибрационное воздействие движения трамваев и железнодорожного транспорта на деревья // Актуальні проблеми ботаніки та екології. Матеріали міжнародної конференції молодих учених (13–16 серпня 2008 р., м. Кам'янець-Подільський). К., 2008. С. 177–178.
2. Никулина В.Н., Корниенко В.О., Панкова Я.С., Щербинина В.К. Влияние вибраций на растительные и животные организмы // Актуальні проблеми ботаніки та екології. Матеріали міжнародної конференції молодих учених (13–16 серпня 2008 р., м. Кам'янець-Подільський). К., 2008. С. 175–176.

INVESTIGATION OF THE TREES' ENDURANCE FOR VIBRATIONS

V. Kornienko, M. Netsvetov, V. Nikulina, O. Suslova

*Donetsk National University
Universitetskaya Str., 24, UA – 83055 Donetsk, Ukraine
e-mail: max@dongu.donetsk.ua*

Spreading of the vibrations on the tree and its extinction on it were investigated. Elastic waves on the ground were caused by a hammer. These waves were registered on the different distances both on the ground and on the tree. The signal was processed by the method of Furie's fast transformation. Amplitude spectrums were got and were compared both with each other and spectrums of the vibrations on the ground and trees' spectrums from the transport's motions. We also identified the most steady trees for the effect of vibrations from the transport's motions.

Key words: vibrations, trees, *Platanus orientalis*, *Pseudotsuga*, *Magnolia soulangiana*, *Quercus rubra*.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ДЕРЕВЬЕВ К ВИБРАЦИЯМ

В. Корниенко, М. Нецветов, В. Никулина, О. Суслова

*Донецкий национальный университет
ул. Университетская, 24, 83055 Донецк, Украина
e-mail: max@dongu.donetsk.ua*

Исследовано распространение вибраций на дереве и их затухание на нем. Упругие волны вызывались на почве с помощью ударника и регистрировались на различном расстоянии как на самой почве, так и на дереве. Сигнал обрабатывался методом быстрого преобразования Фурье в результате чего получались амплитудные спектры, которые сравнивались между собой и со спектрами вибраций почвы и деревьев от движения транспорта. В результате исследований определили наиболее стойкие к действию вибраций от движения транспорта сорта деревьев.

Ключевые слова: вибрации, деревья, платан восточный, псевдоцуга, магнолия суланжа, дуб красный.

Стаття надійшла до редколегії 01.10.2008
Прийнята до друку 20.07.2009