
ФІЗИКА ҐРУНТІВ

УДК 577.3: 58.031

М. В. Нецветов

ВІБРАЦІЇ КОРЕНІВ ДУБА ЗВИЧАЙНОГО *QUERQUS ROBUR* L. ТА ҐРУНТУ, ВИКЛИКАНІ ДІЄЮ ВІТРУ

Донецький ботанічний сад Національної академії наук України

Досліджено вібрації коренів дуба звичайного *Quercus robur* L. та ґрунту в прикоренево-му об'ємі. Отримано результати, що свідчать про генерування вібрацій коренів дерев у результаті вигинів стовбурів та співударів гілок, які передаються ґрунту. Встановлено, що діапазон частот вібрацій коренів та ґрунту (чорнозем звичайний) лежить в області наднизьких та низьких частот, здебільшого від одиниць герц до одиниць кілогерц. Коефіцієнт згасання вібрації у ґрунті в об'ємі кореневої системи складає $2,23 \pm 0,23$ Нп·м⁻¹. Обговорюється вплив вібрацій та розгойдування дерева на фізичні властивості ґрунту.

Ключові слова: дерево, ґрунт, вібрація, частота, згасання.

М. В. Нецветов

Донецкий ботанический сад Национальной академии наук Украины

ВІБРАЦІЇ КОРНЕЙ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО *QUERQUS ROBUR* L. И ПОЧВЫ, ВЫЗВАННЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА

Исследованы вибрации корней дуба черешчатого *Quercus robur* L. и почвы в прикорневом объеме. Получены результаты, которые свидетельствуют о генерировании вибраций корней деревьев в результате изгибов стволов и соударения ветвей, которые передаются почве. Установлено, что диапазон частот вибраций корней и почвы (чернозем обыкновенный) лежит в области сверхнизких и низких частот, в основном от единиц герц до единиц килогерц. Коэффициент затухания вибрации в почве в объеме корневой системы составляет $2,23 \pm 0,23$ Нп·м⁻¹. Обсуждается влияние вибраций и раскачивания дерева на физические свойства почвы.

Ключевые слова: дерево, почва, вибрация, частота, затухание.

M. V. Netsvetov

Donetsk Botanical Garden of the NAS of Ukraine

WIND INDUCED VIBRATIONS OF ENGLISH OAK ROOTS AND SOIL

The main purpose of this work is the examination of plantborn and soilborne vibrations. It is shown that the wind induced plant tissues deformations and branches clashing produce the elastic wave or vibrations which propagate through roots to the soil. It is defined the frequencies range of plantborn and soilborne vibrations are in the ultralow and sound range. The damping ratio of soilborne vibration is about $2,23 \pm 0,23$ Np·m⁻¹. The influence of vibration on soil physics is discussed.

Key words: tree, soil, vibration, frequency, damping.

Дія вітру на дерева призводить до біохімічних, фізіологічних та морфологічних змін – сейсмо- та тигмореакцій, що є характерними для рослин як живих організмів (Telewski, 2006). Деревя реагують на вітрове навантаження і як механічна система, вигинаючись та розгойдуючись. Стійкість рослин до дії вітру забезпечується декількома механізмами (Niklas, 1992). 1. Перетворенням енергії вітру в енергію коливання стовбура, гілок та листя. 2. Згасанням цих коливань унаслідок внутрішнього тертя в тканинах рослини. 3. Згасанням коливань при співударах гілок сусідніх дерев.

© Нецветов М. В., 2010

4. У результаті аеродинамічного опору надземних частин рослини та при терті коренів і ґрунту. Коли механічне навантаження на крону є вищим за деяку межу, відбувається обламування гілок, стовбура та коренів, дерево або викорчовується, або обламується. Характер екстремальних пошкоджень залежить від властивостей ґрунту та типу кореневої системи дерева.

Крім наднизькочастотних розгойдувань стовбура та гілок, обдування вітром з певною швидкістю призводить до їх вібрації (Нецветов, 2003). Існує й інший механізм виникнення вібрації рослин – збудження пружної хвилі при деформації рослинних тканин під час вигину стовбура й гілок та при їх співударах. Непрямо про це свідчить шум у лісі при сильному вітрі, який виробляють вібруючі гілки рослин. З цього також випливає, що частота вібрації може бути набагато вищою від частоти розгойдування гілок та стовбурів дерев. Це підтверджується одиничними експериментальними дослідженнями на трав'янистих рослинах (Casas et al., 2007). Екологічне значення таких вібрацій обговорюється лише в останні десятиліття в основному у зв'язку з вібраційною комунікацією тварин, які використовують рослини в ролі субстрату для передачі вібраційних сигналів (Hill, 2009).

Менш дослідженим аспектом екологічних властивостей вібрацій і розгойдувань рослин є їх ефекти в ґрунті. Про них свідчать лише окремі праці, в яких показано, що розгойдування дерева призводить до утворення тріщин у ґрунті, котрі полегшують переміщення ґрунтових організмів (Hintikka, 1973), посилення гідропотоку в ньому (Данилик и др., 1989) і сепарації ґрунтових частинок (Нецветов, 2009). Однак у доступній літературі відсутні праці, присвячені вібраціям кореневої системи та ґрунту, які виникають при дії вітру на крону дерева. У зв'язку з цим метою дослідження було охарактеризувати вібрації коренів дуба звичайного *Quercus robur* L. та ґрунту у прикореневому просторі, що спричинені коливаннями дерева.

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі досліджували вібрації коренів та ґрунту в прикореневому об'ємі трьох дерев *Quercus robur* (Q1, Q2, Q3), 35–40-річного віку, що ростуть у посадці в передмісті Донецька. Спочатку дерева було посаджено на чорноземі звичайному. Частину коренів дерев відкопували до глибини 1,0–1,2 м. Виміри вібрацій проводили на коренях та біля основи стовбура, а також у ґрунті в об'ємі кореневої системи. Для реєстрації вібрацій використовували п'єзоелектричні датчики та осцилоскоп НРS 10 фірми «Velleman» (Бельгія) (Нецветов, 2008).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з наведених на рис. 1 осцилограм, вібрації коренів *Quercus robur* модулюються низькочастотними коливаннями стовбура та посилюються при його максимальному відхиленні від положення рівноваги на кожному півперіоді.

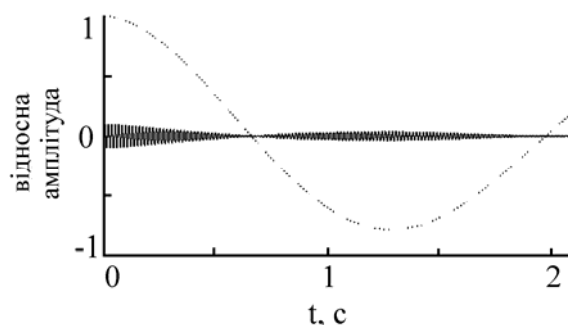


Рис. 1. Осцилограма вібрації кореня дуба звичайного *Quercus robur* L. (Q1) (суцільна лінія), викликана розгойдуванням стовбура (пунктир)

Для досліджених дерев вібрації основи коренів відбувалися на частотах у межах 60–80 Гц (рис. 2). На амплітудних спектрах, окрім основного піка, виокремлюються

два додаткових, розташованих на відстані, приблизно рівній частоті розгойдування стовбура, що свідчить про модуляцію. Частота модуляції відповідає частоті розгойдування стовбура, яка, як і коефіцієнт згасання, змінювалася залежно від сезону. Достовірних змін частоти вібрації у різні сезони віднайти не вдалося.

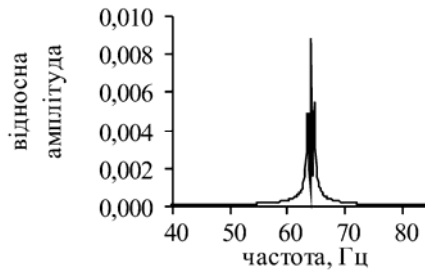


Рис. 2. Амплітудний спектр вібрації кореня дуба Q1, індукований розгойдуванням стовбура

Розглянемо частоти та амплітуди пружних хвиль, індуковані розгойдуванням під дією поривів вітру (середня швидкість вітру до 20 м/с), на коренях поблизу (до 15 см) їх відгалуження від центрального кореня дуба Q2. Наведені результати отримано, на відміну від описаних вище, при розгойдуванні вітром, коли гілки співударялися. Корінь на глибині $h=28$ см, максимальна амплітуда $A_m=1,28$ мкм, частота $f \sim 110$ Гц; на $h=30$ см – $A_m=2,17$ мкм, $f_1=75$ Гц; $f_2=50$ Гц; $f_3=100$ Гц; на $h=40$ см – $A_m=2,23$ мкм, $f_1=180 \pm 5$ Гц; $f_2=212 \pm 3$ Гц; $f_3=45 \pm 5$ Гц центральний стрижень на глибині 58 см – $A_m=1,46$ мкм, $f_1=115 \pm 5$ Гц; $f_2=175-200$ Гц. З наведених даних видно, що пікові значення амплітуд вібрацій припадають на частоти в діапазоні до 200 Гц.

В окремих випадках реєструвалися й більш високочастотні пружні хвилі на верхніх коренів дуба Q2. На рис. 3, а наведено амплітудні спектри вібрацій на центральному стрижневому корені на глибині 60 см від двох послідовних поривів вітру. В одному з випадків основні піки амплітуди вібрації припадали на частоти до 170 Гц (пунктир на рис. 3 а), в іншому (суцільна лінія) — до ~ 400 Гц. Піки менших амплітуд реєструються на ще більш високих частотах: 440-495 Гц; ~ 580 Гц; ~ 680 Гц; ~ 760 Гц; 850 Гц; ~ 950 Гц; ~ 1100 ; ~ 1300 Гц; ~ 1400 Гц. Присутність високих (кГц) частот у спектрах є більш помітною на залежності величини віброшвидкості та віброприскорення від частоти вібрації (рис. 3 б, в).

Під час сильних розгойдувань дерева в об'ємі кореневої системи візуально визначається розбиття прикореневого об'єму ґрунту на блоки та їх зміщення один щодо одного. Зміщення відбуваються синхронно з коливаннями стовбура, тобто на наднизьких частотах. Крім того, візуально легко визначається стискання ґрунту в блоках, утворення тріщин усередині блоків. Очевидно, що зміщення, тертя, стискання та розтягування блоків призводять й до виникнення пружної хвилі безпосередньо в ґрунтовому об'ємі.

У прикореновому об'ємі ґрунту також реєструються вібрації. В якості ілюстрації можна навести спектри вібрацій ґрунту (рис. 4), зареєстровані на глибині 70 см при розгойдуванні крони поривами вітру (до 10 м/с). Поблизу кореня в 10 і 30 см від нього реєструвалися вібрації, на амплітудних спектрах яких піки припадають на наднизькі (менше 5 Гц) та низькі частоти (до 150 Гц) (рис. 4 а, б). На відстані 70 см було зареєстровано вібрації з більш високими частотами в звуковому діапазоні (рис. 4, в).

Згасання вібрації ґрунту від розгойдування дерева відбувається нерівномірно. Так, пікові значення амплітуди вібрації на відстані 10, 30 і 70 см від кореня були $3,2 \pm 0,65$; $3,6 \pm 0,72$; $1,5 \pm 0,30$. Напевно, це пов'язано зі складанням хвиль від кількох коренів, а також із хвилями, що виникають під час тертя та зіштовхування ґрунтових блоків. Для визначення коефіцієнту згасання вібрації ґрунту, переданій їй від коренів дерева, та виключення впливу блоків ґрунту один на одного ми використовували метод «тест-удару». Вібрацію індукували на стовбурі на висоті грудей та реєстрували її амплітуду в ґрунті на різній відстані від центрального кореня (рис. 5). Коефіцієнт згасання вібрації у ґрунті на глибині 70 см склав $2,23 \pm 0,23$ Нп·м⁻¹, що можна порівняти зі згасанням на коренях (Нецветов, 2009).

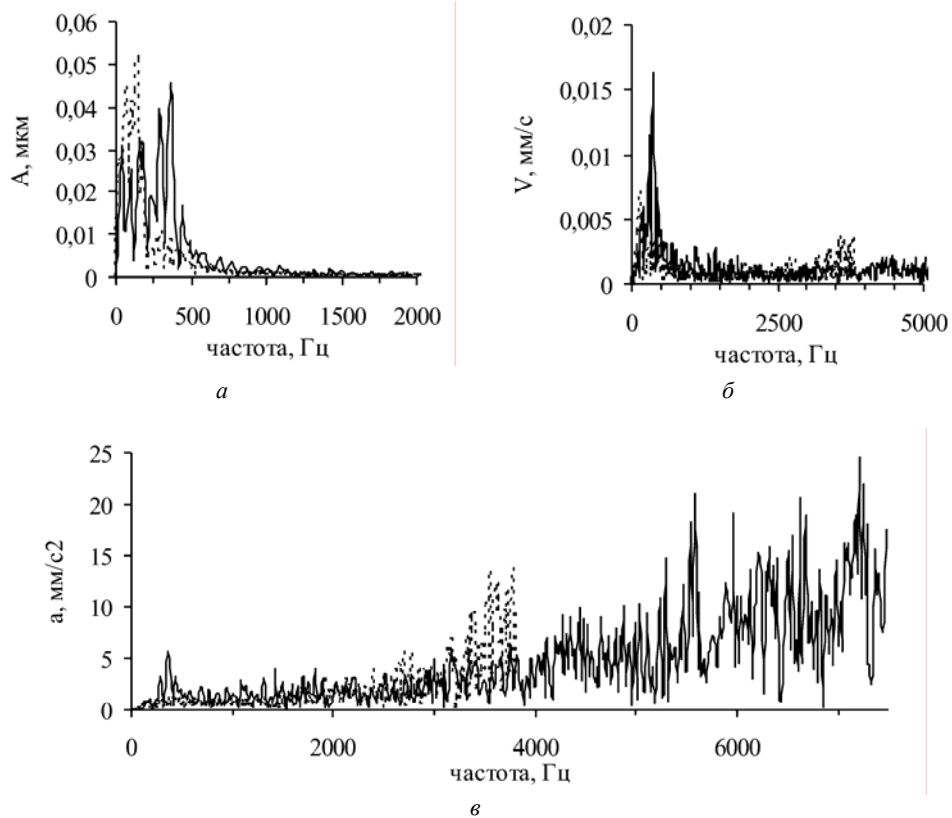


Рис. 3. Амплітуда зміщення (*a*), віброшвидкості (*b*) та віброприскорення (*v*) на різних частотах при вібрації кореня дуба *Q2*, викликана двома послідовними поривами вітру

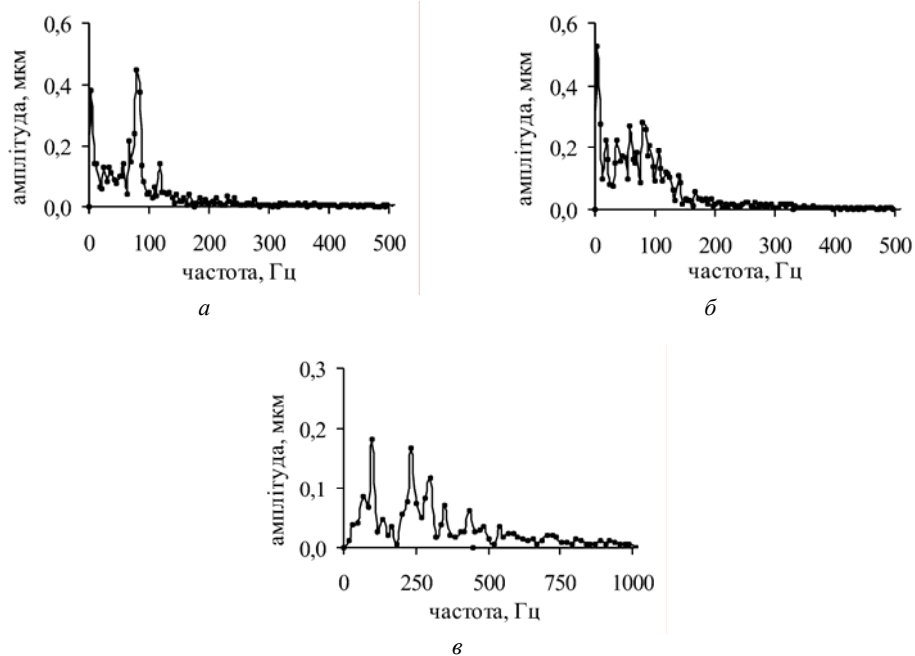


Рис. 4. Амплітудні спектри вібрації ґрунту на глибині 70 см при розгойдуванні дуба *Q3* від поривів вітру (~10 м/с):

а – місце реєстрації на відстані 10 см від центрального кореня; б – 30 см; в – 70 см

Таким чином, енергія вітру, передана дереву, частково передається ґрунту у вигляді пружних хвиль. Про їх можливі ефекти в ґрунті можна судити з результатів модельних експериментів. Віб्राції у діапазоні частот 100–400 Гц з амплітудами ~2–10 мкм індукували проникнення нано- і мікрометрових частинок карбонільного заліза та нікелю в поровий простір ґрунтових зразків. Час переміщення навішення частинок скорочувався при збільшенні їх розміру. Зі збільшенням глибини відбору ґрунтових зразків час занурення частинок зростає. Ефект вібрації спостерігався на всіх досліджених частотах, але максимальний ефект був на частоті 200 Гц. Основним механізмом занурення частинок у порові простори ґрунту є ефект віброзрідження, при якому енергія вібрації передається частинкам, дозволяє їм подолати сили тертя та призводить до їх зміщення. Якщо частинка перебувала поблизу пор або на їх поверхні, то вібрація може індукувати їх зміщення під дією сили ваги. Можливість резонансного поглинання енергії вібрації ґрунтовими частинками, напевно, виключена, принаймні для зареєстрованих нами частот.

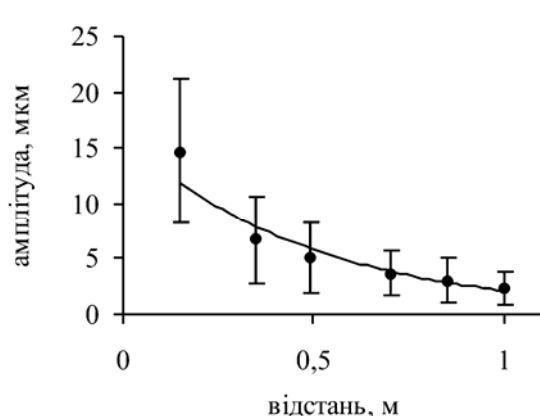


Рис. 5. Згасання вібрації у ґрунті, викликане ударом об стовбур дуба Q3, залежно від відстані

Власна частота коливань будь-якого тіла визначається коренем квадратним відношення його коефіцієнта жорсткості C до маси m : $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/m}$. Коефіцієнт жорсткості визначається як відношення сили стискування або розтягання тіла до його подовження, для сферичної частинки може бути виражений через модуль Юнга E (модуль пружності), площа S поперечного перерізу і радіус r частинки: $C = E \cdot S/r$. Виражаючи масу частинок через добуток її щільності ρ та об'єму (для сфери $V = 4/3 \cdot \pi r^3$), одержуємо вираження для частоти: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{3}{r}}$ або $f = \frac{3^{1/2}}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{d}$, де v – швидкість звуку в речовині, d – діаметр частинки. Застосовуючи значення швидкості звуку й модуля пружності для ґрунту, можна оцінити значення власних частот для ґрунтових агрегатів і блоків, що утворюються при розгойдуванні дерева. Діапазон зареєстрованих нами механічних коливань та вібрацій коренів перекриває власні частоти ґрунтових агрегатів і блоків з діаметром від декількох міліметрів і вище (рис. 6).

Розглянемо шар суміші частинок (<200 мкм) ґрунту чорнозему звичайного для ілюстрації псевдозріджуючого ефекту вібрації поза резонансом зі структурними частинами субстрату або власними частинками. Два навішення частинок, прикріплені до похилої (30°) площини, розміщали на папері. Одразу після розташування на похилій площині частинки розсипалися (рис. 7 а) у вигляді еліпсу. Вібрація з частотою 100 Гц однієї з поверхонь призвела до подовження еліпсу (рис. 7 б): спочатку частинки накопичуються біля його нижньої межі шару, після досягнення деякої критичної маси частина з них переміщується нижче і т.д.

Іншим ефектом вібрації може бути посилення гідропотоку по порах і тріщинах у ґрунті, що спостерігалось в експериментах. Тут можна вказати на два основні механізми: 1) утворення додаткових пор і тріщин та розширення вже наявних; 2) полегшення виходу повітря з пор, що спостерігалось в нашій попередній роботі.

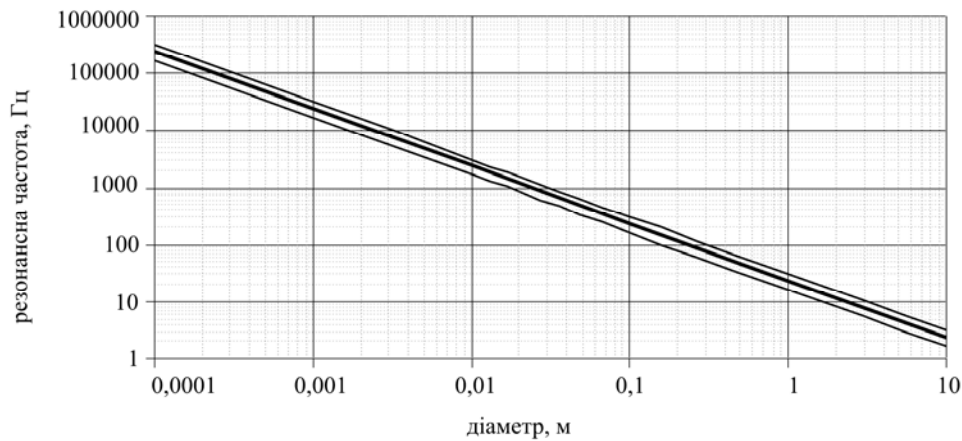


Рис. 6. Залежність резонансних (власних) частот ґрунтових агрегатів (блоків) від їх лінійних розмірів. Верхня лінія відповідає швидкості звуку в ґрунті 113 м/с, середня – 86,5 м/с, нижня – 60 м/с

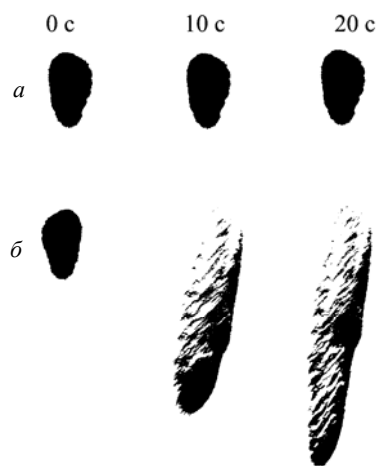


Рис. 7. Стікання шару суміші ґрунтових частинок (розмір $<200\text{ мкм}</math>) по похилій поверхні протягом часу (0, 10, 20 с):$

a – без дії вібрації; *б* – при дії вібрації з частотою 100 Гц

Виходячи зі всього вищесказаного, можна припустити схему впливу вібрацій на процеси механічного переміщення частинок дрібних фракцій униз по профілю ґрунту. Згідно з уявленнями Ф. Дюшофура, переміщенню мінеральних частинок передують фізична дезагрегація, її головні механізми – формування та розширення тріщин під дією температурних коливань; денудація факторами ерозії. Разом з цим формування тріщин та подрібнення агрегатів, певною мірою, проявляються і при впливі коливних стовбурів та коренів дерев, про що свідчать наші власні спостереження та данні інших авторів (Даннилик и др., 1989; Hintikka, 1973). Вібраційну дезагрегацію та просіювання частинок через порові простори і тріщини в сухому стані віднесемо до першого етапу впливу вібрацій на винесення колоїдів. На другому етапі, коли в ґрунті досить гравітаційної води, наявність вібрацій буде відображена, в першу чергу, на збільшенні швидкості гідропотоку з частинками, що знаходяться в ньому (Нецветов, 2009).

ВИСНОВКИ

Одержані результати свідчать про генерування вібрацій коренів дерев у результаті вигинів стовбурів під дією вітру, які передаються ґрунту в прикореневому об'ємі. Діапазон частот вібрацій коренів *Quercus robur* та ґрунту знаходиться в обла-

сті наднизьких і низьких частот, в основному від одиниць герц до одиниць кілогерц. Коефіцієнт згасання вібрації у ґрунті в об'ємі кореневої системи склав $2,23 \pm 0,23 \text{ Нп} \cdot \text{м}^{-1}$. При дії вітру на крону в ґрунті виникають тріщини та блоки різних розмірів, тертя та зміщення яких також призводить до виникнення пружних хвиль. Частоти розгойдування та вібрації *Q. robur* формально відповідають власним частотам ґрунтових агрегатів та блоків з розмірами від одиниць міліметрів і більше. Вібрації дерева, що передаються ґрунту, можуть індукувати переміщення та сепарацію ґрунтових частинок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Данилик В. Н.** Влияние колебаний деревьев на водопроницаемость почвы / В. Н. Данилик, Г. П. Макаренко, О. В. Толкач // Лесоведение. – № 1. – 1989. – С. 40-45.
- Нецветов М. В.** Вибрации в лесу под действием ветра (теоретический аспект оценки частот) / М. В. Нецветов // Екологія та ноосферологія. – 2003. – Т. 13, № 1-2. – С. 87-92.
- Нецветов М. В.** Вибрационное перемещение нано- и микрочастиц в почве / М. В. Нецветов // Ґрунтознавство. – 2009. – Т. 10, № 1-2. – С. 44-48.
- Нецветов М.** Вібраційний вплив автомобільного транспорту на дерева придорожніх смуг / М. Нецветов, О. Сулова // Вісник Львівського університету. Серія Біологічна. – 2008. – Вип. 48. – С. 75-82.
- Casas J.** Dispersive and non-dispersive waves through plants: implications for arthropod vibratory communication / J. Casas, C. Magal, J. Sueur // Proceedings of the Royal Society B. – 2007. – 274. – P. 1087-1092.
- Hill P.S.M.** How do animals use substrate-borne vibrations as an information source? / P.S.M. Hill // Naturwissenschaften. – 2009. – 96. – P. 1355-1371.
- Hintikka V.** Wind-induced root movements in forest trees / V. Hintikka // Metsäntuki muslaitok julk. – 1973. – V. 76, N 2. – P. 1-56.
- Niklas K.J.** Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function / K.J. Niklas. – Chicago: University of Chicago Press, 1992. – 622 p.
- Telewski F.W.** A unified hypothesis of mechanoperception in plants / F.W. Telewski // American journal of botany – 2006. – V. 93. – P. 1466-1476.

Надійшла до редколегії 05.10.10