

## СКОРОСТЬ ЗВУКА И МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ПОЧВЫ: ИЗМЕРЕНИЕ И РОЛЬ В ПЕРЕДАЧЕ ВИБРАЦИЙ ДЕРЕВА НА ПОЧВУ

*Донецкий ботанический сад НАН Украины*

Распространение вибраций в почве обусловлено рядом естественных или техногенных причин. Энергия упругой волны, передающаяся почве от источника, определяется соотношением скорости ее распространения, плотности и модуля упругости почвы и источника. В полевых условиях скорость звука и модуль упругости можно измерить с помощью двух датчиков, например пьезоэлектрических, и осциллоскопа. Измеренная по описанной методике скорость распространения звука в почве (чернозем обыкновенный) варьирует от ~60 до ~110 м/с в зависимости от степени увлажнения. Значения модуля упругости изменяется от 7,9 до 15,5 МН/м<sup>2</sup>. Почве с такими значениями скорости распространения упругой волны, модуля упругости и плотности в ~1100–1250 кг/м<sup>3</sup> передается до 20 % энергии вибрации корней деревьев при раскачивании.

*Ключевые слова: скорость звука, модуль упругости, почва, вибрации.*

М. В. Нецветов

*Донецкий ботаничний сад НАН України*

## ШВИДКІСТЬ ЗВУКУ ТА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ ҐРУНТУ: ВИМІРЮВАННЯ Й РОЛЬ У ПЕРЕДАЧІ ВІБРАЦІЙ ДЕРЕВА НА ҐРУНТ

Поширення вібрацій у ґрунті обумовлене низкою природних або техногенних причин. Енергія пружної хвилі, що передається ґрунту від джерела, визначається співвідношенням швидкості її поширення, щільності та модуля пружності ґрунту та джерела. У польових умовах швидкість звуку й модуль пружності можна виміряти за допомогою двох датчиків, наприклад п'єзоелектричних, та осцилоскопа. Виміряна за описаною методикою швидкість поширення звуку в ґрунті (чорнозем звичайний) варіює від ~60 до ~110 м/с залежно від ступеня зволоження. Значення модуля пружності змінюється в межах від 7,9 до 15,5 МН/м<sup>2</sup>. Ґрунту з такими значеннями швидкості поширення пружної хвилі, модуля пружності та щільністю в ~1100–1250 кг/м<sup>3</sup> передається до 20 % енергії вібрації коренів дерев при розгойдуванні.

*Ключові слова: швидкість звуку, модуль пружності, ґрунт, вібрації.*

M. V. Netsvetov

*Donetsk Botanical Garden NAS of Ukraine*

## SPEED OF SOUND AND ELASTICITY MODULUS OF SOIL: MEASUREMENT AND ROLE IN TREES VIBRATION PROPAGATION AT SOIL

Elastic waves propagation in soil is induced by natural and anthropogenic causes. The coefficient of vibrations propagation from source to soil depends on elastic modulus, speed propagation and density of soil and source. The measurement of speed of sound in the soil is developed using two piezoelectric elements and oscilloscope. The value of speed of sound in soil increases with decreasing of water content and determined from 60 to 110 m/s. The elasticity modulus ranged from 7,9 to 15,5 MN/m<sup>2</sup>. The measured properties and density from 1100 to 1250 kg/m<sup>3</sup> define value about 20% of energy transduction on soil from trees oscillation.

*Key words: speed of sound, elasticity modulus, soil, vibration.*

Воздействие ветра, дождя и некоторые другие причины приводят к возникновению и распространению по растениям упругих волн (или вибраций). Можно указать два механизма возникновения вибраций растений в результате воздействия ветра. Во-первых, отклонения и раскачивания листьев, ветвей и ствола в местах их изгиба и ответвления/закрепления вызывают упругие деформации, которые порождают упругую волну. Вибрации индуцируются также при трении и соударении ветвей и листьев. Во-вторых, при определенной скорости ветра из-за несимметричности отрыва потока воздуха от поверхности частей растений они также

начинают вибрировать (Нецветов, 2003). Примечательно, что если в первом случае частота вибрации не зависит от силы ветра, то во втором она связана с ней прямо пропорционально (Гришин, 2001):

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

где  $Sh=0,2$  – число Струхала,  $v$  – скорость ветра;  $d$  – диаметр обтекаемого сечения.

Как видно из формулы, элементы дерева с малым диаметром будут вибрировать с большими частотами при одной и той же скорости ветра. Уже при 5 м/с небольшие веточки и черешки листьев будут вибрировать с частотами в слышимом диапазоне.

В случае же вибрации, индуцированной изгибами частей растений, частота определяется скоростью распространения упругой волны в древесных волокнах:

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

где  $\lambda$  – длина волны. В свою очередь, скорость распространения звука в среде определяется модулем упругости  $E$  и плотностью:

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

Неоднородности растительных волокон обуславливают явления дифракции, интерференции и, как результат, наличие нескольких частот упругих волн. Вызванные различными причинами вибрации частей растений распространяются на корни. Здесь почве передается часть энергии вибраций, которая определяется квадратом отношения разности волновых сопротивлений к их сумме – коэффициентом отражения упругой волны:

$$C = \left( \frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1} \right)^2, \quad (3)$$

Волновое сопротивление (импеданс) – произведение скорости упругой волны в среде и ее плотности:

$$Z = v \cdot \rho, \quad (4)$$

или из (2):

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

Из выражения (4) следует, что коэффициент отражения будет ниже при близких значениях волновых сопротивлений двух сред, а значит, и часть передаваемой почве от дерева энергии будет выше, чем при сильно отличающихся  $Z1$  и  $Z2$ . Поскольку плотность и модуль упругости зависят от влажности, то, как видно из (5), при этом будет изменяться и волновое сопротивление. Для ветвей одного и того же дерева плотность, модуль упругости и волновое сопротивление значительно варьируют (табл. 1 ( $E$  и  $\rho$  – измерены,  $v$  и  $Z$  – рассчитаны)). Для сухой ветви характерно минимальное значение импеданса, а максимальные выше почти в два раза.

Таблица 1

**Значения волнового импеданса дуба черешчатого при различных значениях плотности, модуля упругости и скорости упругой волны**

№ п/п	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E \cdot 10^9$ , Н/м <sup>2</sup>	$v$ , 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	1756,4	1651,1

\* Сухая ветка.

Большинство почв, как известно, обладают плотностью от 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Скорость распространения звука в почвах изменяется в основном от 85 до 180 м/с. Для определения диапазона значений волнового импеданса почвы можно воспользоваться формулой (4). Результаты расчетов представлены в табл. 2 (жирным выделены значения, характерные для наиболее распространенных  $v$  и  $\rho$ ). Как видно из табл. 1 и 2, волновые сопротивления почвы и дерева отличаются приблизительно на порядок. На рис. 1 приведены значения коэффициента пропускания,  $I-C$ , в зависимости от звукового сопротивления почвы – для древесных волокон с различным соотношением плотности и модуля упругости он может достигать и превышать 50 %.

Таблица 2

Рассчитанные значения волнового импеданса ( $10^3$ , Па·с/м) почвы при различных значениях плотности и скорости упругой волны

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

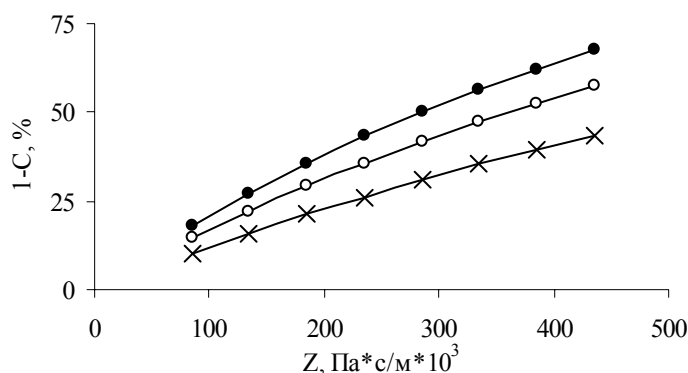


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения плоской упругой волны с дерева на почву от волнового импеданса почвы при различных значениях плотности и модуля упругости древесных волокон. Для № 1 из табл. 1 – ●; № 2 – ○; № 4 – ×

По указанным общеизвестным формулам можно проводить оценку передаваемой энергии колебаний от растения почве. Тем не менее для большей точности необходимо проводить измерения основных параметров. Если для растений экспериментальное изучение модуля упругости не представляет сложностей, то для почвы его измерение является достаточно сложным. Существует несколько способов его измерения, которые для дорожных и строительных работ регулируются ГОСТ 12248-96 и 20276-85. Модуль упругости грунта определяется из закона Гука как коэффициент соответствия между приращением нагрузки  $\sigma$  на грунт и соответствующей его деформацией  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma.$$

Основная сложность прямых измерений состоит в определении величины деформации почвы от нагрузки, которая не вызывает разрушения ее структуры. Модуль упругости можно вычислить по (2), зная плотность, которая легко определяется в лабораторных условиях, и скорость звука в почве. Последняя измеряется в лабораторных или полевых условиях как расстояние  $\Delta l$ , пройденное волной за время  $\Delta t$ . В лабораторных условиях целесообразно применять ультразвуковые установки (Oelze et al., 2002). Основное преимущество метода измерения скорости упругой волны с применением ультразвука состоит в отсутствии необходимости использования больших объемов почв. Исследование производится путем определения времени прохождения ультразвукового сигнала через образец почвы известных линейных размеров. Минимальное оборудование для таких исследований включает компьютер, ультразвуковой излучатель, ультразвуковые датчики, что усложняет его применение в полевых условиях. Однако здесь можно обойтись лишь двумя пьезоэлектрическими датчиками, ударником и осциллоскопом. Опишем используемый нами способ измерения скорости распространения упругой волны в почве в полевых условиях.

Суть метода состоит в расположении двух датчиков и ударника на одной линии. Расстояние между датчиками должно быть достаточным для различения сигналов от них на экране осциллоскопа. Приблизительно оценивая скорость звука, равной  $\sim 100$  м/с, и зная длительность сейсмического сигнала, например 10 мс, вычисляем, что для четкого разделения сигналов расстояние между датчиками должно составлять не менее 1-го м, а цена деления осциллоскопа около 10 мс. В ходе исследования фиксируется время между началом сигналов от каждого датчика. В наших исследованиях мы использовали предварительно откалиброванные пьезокристаллические датчики. Поскольку сигнал, проходя расстояние более метра, значительно затухает, дальний по отношению к ударнику датчик соединяли с осциллоскопом через усилитель. Исследовали почву в Донецком ботаническом саду на участке с медвежьим орехом и во дворе биологического факультета. На обоих участках первоначально деревья высаживались на черноземе обыкновенный. Влажность почвы составляла не более 10 % от веса в верхнем слое (5 см) и до 50 % на глубине более 25 см. Плотность –  $1217 \pm 2$  и  $1220 \pm 2$  кг/м<sup>3</sup> в саду биофака и ботанического сада соответственно.

На рис. 2 приведена осциллограмма вибрации, вызванной ударом о почву в саду биофака ДонНУ. Стрелками обозначено начало сигнала от первого и второго датчиков (расстояние 2,2 м). Сигналы следуют друг за другом через  $20 \pm 0,5$  мс. Таким образом, скорость упругой волны в почве составляет  $110,0 \pm 2,75$  м/с. Аналогичным образом была вычислена скорость волны в почве в Донецком ботаническом саду, она составила  $96,9 \pm 4,1$  м/с. При увлажнении почвы до 25–30 % по массе скорость снизилась до  $62 \pm 2$  м/с.



Рис. 2. Осциллограмма вибрации почвы, вызванной ударом. Масштаб черты – 10 мс

По измеренным значениям скорости упругой волны в почве и ее плотности по формуле (2) вычисляем модуль упругости (модуль Юнга). Он составил  $13,993$ – $15,516$  МН/м<sup>2</sup> в саду биофака и  $10,156$ – $12,465$  МН/м<sup>2</sup> в Ботаническом саду. При насыщении влагой почвы в Ботаническом саду Е составил  $7,906$ – $8,995$  МН/м<sup>2</sup>. Значения волновых импедансов, рассчитанные по формуле (4), –  $113,1$ – $123,5 \cdot 10^3$  и  $131,8$ – $140,5 \cdot 10^3$  Па·с/м для сухой и насыщенной влагой почвы соответственно. Для почвы в саду биофака –  $130,4$ – $137,5 \cdot 10^3$  Па·с/м. Такие значения импеданса обеспечивают передачу почве  $\sim 20 \pm 5$  % энергии вибрации корней и ствола у основания деревьев таких пород, как дуб черешчатый.

## ВЫВОДЫ

Скорость распространения звука в почве и модуль ее упругости являются важными физическими характеристиками, от которых зависит частота и коэффициент передачи вибраций от дерева почве или от почвы дереву. Для почв под городскими насаждениями (первоначально чернозем обыкновенный) скорость звука варьирует от ~60 до ~110 м/с в зависимости от степени увлажнения. Значение модуля упругости изменяется в пределах от 7,9 до 15,5 МН/м<sup>2</sup>. Почве с такими значениями скорости распространения упругой волны, модуля упругости и плотностью в ~1100-1250 кг/м<sup>3</sup> передается до 20 % энергии вибрации корней деревьев при раскачивании.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

**Гришин А. М.** О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влиянии на режимы воспламенения и горения / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, В. В. Медведев // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 4. – С. 127-135.

**Нецветов М. В.** Вибрации в лесу под действием ветра (теоретический аспект оценки частот) / М. В. Нецветов // Экологія та ноосферологія. – 2003. – Т. 13, № 1-2. – С. 87-92.

**Oelze M. L., W. D. O'Brien, Jr. Darmody et al.** Measurement of attenuation and speed of sound in soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2002. – 66. – P. 788-796.

*Надійшла до редколегії 15.09.09*