

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ В ЧЕРНОЗЕМЕ ЛЕСНОМ

¹Донецкий ботанический сад НАН Украины
²Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара

Рассмотрено распределение генетических горизонтов чернозема лесного по скорости вибрационной миграции частиц в эксперименте. Показано, что максимальные скорости лессиважа под действием вибрации зависят от таких физических свойств почвы, как общая пористость и содержание коллоидной фракции почвенных частиц.

Ключевые слова: лессиваж, вибрации, чернозем лесной.

М. В. Нецветов¹, В. А. Горбань²

¹Донецький ботанічний сад НАН України
²Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МОДЕЛЬ ВІБРАЦІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЧАСТИНОК У ЧОРНОЗЕМІ ЛІСОВОМУ

Розглянуто розподіл генетичних горизонтів чорнозему лісового за швидкістю вібраційної міграції частинок в експерименті. Показано, що максимальні швидкості лесиважу під дією вібрації залежать від таких фізичних властивостей ґрунту, як загальна пористість та вміст колоїдної фракції ґрунтових частинок.

Ключові слова: лесиваж, вібрації, чорнозем лісовий.

M. V. Netsvetov¹, V. A. Gorban²

¹Donetsk Botanical Garden of NAS of Ukraine
²O. Gonchar Dnipropetrovsk National University

EXPERIMENTAL MODEL OF VIBRATING MIGRATION OF PARTICLES IN FOREST CHERNOZEM

The distribution of genetic horizons of forest chernozem is analysed by the speed of vibrating migration of particles in the experiment. The maximum lesivage speeds under vibration depend on such physicals properties of soil as porosity and colloidal content of soil particles.

Key words: lesivage, vibration, forest chernozem.

Воздействие ветра на дерево не только приводит к раскачиванию ветвей и ствола, колебаниям листьев, но и вызывает смещения и вибрации корней. Движения корней происходят в вертикальной и горизонтальной плоскостях, они также подвержены изгибам и кручениям (Нецветов, 2006; Dupuy et al., 2007). Величина смещения корня зависит от направления его роста относительно плоскости колебания ствола (Данилик, 1989); от глубины, на которой располагается корневая система, и от скорости ветра (Rizzo and Harington, 1988), которая определяет отклонение ствола от вертикального положения. Отклонение на 1° ствола ели (*Picea abies* L.), растущей на глинистой почве, вызывает поднятие поверхности корней на ~3 мм, а смещение 3° – на ~13 мм (Hintikka, 1972). При раскачивании кроны всегда какой-то объем почвы перемещается вместе с корнями вследствие их механического закрепления. Если ветер достигает среднечасовой скорости 20–25 м/с и более или скорость отдельных порывов – более 40 м/с, то на деревья и почву оказывается максимальное воздействие, результатом которого является выкорчевывание или облом стволов (Quine, 1989). В остальных случаях энергия ветра, переданная дереву, гасится в почве за счет трения между ней и корнями, внутреннего трения почвы при упругих и пластических деформациях (Dupuy et al., 2007), вызванных попеременным сжатием и растяжением. Очевидно, что последнее может происходить лишь в определенных пределах, за чем следует образование трещин и смещение блоков почвы относительно друг друга (Травлеев, 2007).

Энергия ветра передается почве и в виде упругой волны (вибрации), которая образуется в результате деформации древесных волокон в местах перегибов ветвей и ствола при раскачивании, а также при трении и соударении ветвей (Нецветов, 2007). Если смещения корней и их воздействие на почву происходит со сверхнизкими частотами, соответствующими частотам качания ствола, то диапазон вибраций достигает сотен герц. Не исключено и присутствие еще более высоких частот в области ультразвука, однако они быстро затухают.

Собственные частоты вибраций корней, как и других частей дерева, определяются их размерами и механическими свойствами древесных волокон. Кроме собственных частот в спектрах присутствуют их обертоны и гармоники. Наличие и состав обертонов зависят от способа возбуждения вибраций, а гармоники определяются механическими свойствами тканей и формой вибрирующей части дерева (Wegst, 06).

Многие важнейшие параметры вибраций определяются модулем упругости и плотностью древесных волокон. Как для живых деревьев, так и для изделий из их древесины показатели являются видоспецифичными. Даже среди только древесных растений они значительно варьируют. Так, среди видов, произрастающих на территории Европы, минимальные значения плотности сухой древесины характерны для ивовых, например 400 кг/м^3 для ивы белой (*Salix alba* L.), максимальные – для самшита (*Buxus sempervirens* L.) – 950 кг/м^3 (Sell, 1989). Модуль упругости (модуль Юнга) – соотношение между приложенной нагрузкой и величиной, вызванной ею упругой деформацией – изменяется в зависимости от направления, в котором приложена сила. Он максимален в направлении роста древесных волокон.

Модуль Юнга и плотность варьируют в зависимости от условий произрастания (Read and Stokes, 2006), в основном от интенсивности регулярных механических нагрузок (ветер, осадки и др.). Изменения в строении тканей в ответ на действие механических нагрузок типа прикосновения и трения (тигмоморфогенез (Jaffe, 1973)) и при изгибах и вибрациях (сейсмоморфогенез (Mitchell et al., 1975; Biddington, 1986)) носят приспособительный характер и направлены на усиление механической прочности. Так как механическая нагрузка распределена неравномерно по высоте ствола, в нижней его части она максимальна, плотность и модуль упругости изменяются соответственно. Оба этих параметра заметно варьируют при изменении влажности древесных волокон. Между плотностью ρ [кг/м^3] и модулем упругости E [Па]· 10^9 существует корреляция: $E=56,3 \cdot \rho^{0,84}$ для мягкой древесины и $121,1 \cdot \rho^{0,7}$ для твердой (Wood Handbook, 1999). Механические характеристики любых частей дерева изменяются также при повреждении растительными животными или паразитами (Read and Stokes, 2006). Таким образом, жизнеспособность растения во многом зависит от его механических свойств, которые находятся под жестким действием отбора (Read and Stokes, 2006).

Собственная частота вибрации определяется из следующего соотношения:

$$f=c/\lambda, \quad (1)$$

где c – скорость упругой волны (скорость звука); λ – длина волны. Длина волны определяется размерами вибрирующей части дерева. Скорость упругой волны

$$c=(E/\rho)^{1/2}, \quad (2)$$

Как следует из формул (1) и (2), скорость звука и основная частота будут изменяться соответственно изменениям плотности и модуля упругости в зависимости от перечисленных выше факторов. Поскольку размеры и механические свойства различных частей дерева сильно отличаются, при распространении вибраций одновременно от нескольких источников суммарный спектр частот становится богаче. Вибрации могут распространяться не только на основных частотах, обертонах и гармониках вибрирующих элементов, но и на частотах вынуждающих источников, но с большим затуханием. В любом случае затухание происходит в результате рассеивания энергии колебания в виде тепла, выделяемого из-за внутреннего трения. Оно зависит от температуры и влажности.

Часть энергии колебаний передается из одной среды в другую, например от корней почве. Отношение интенсивности переданной почве упругой волны к начальной интенсивности вибрации корня определится соотношением

$$I_1/I_0=4z_2z_1/(z_2+z_1)^2, \quad (3)$$

где z_2 и z_1 – волновые сопротивления почвы и корня соответственно. Волновое сопротивление зависит от скорости звука и плотности:

$$z=c\rho=(E\rho)^{1/2}. \quad (4)$$

Таким образом, очевидно, что всегда какая-то часть энергии ветра, действующего на надземные части дерева, передается корням, а от них почве, что и делает возможным закрепление в ней. При этом возникает вопрос о возможных эффектах механической энергии вибрации в почве. В наших экспериментах на натуральном субстрате (чернозем лесоразведенный) и модельных частицах нано- и микрометровых размеров было показано, что вибрация ускоряет их прохождение вглубь почвенных образцов, заполненных влагой, и вынуждает их перемещение в воздушно-сухих образцах (Нецветов, 2008). Целью настоящей работы было изучить спектральные характеристики вибрации корней дуба черешчатого и ее влияние на перемещение наночастиц в образцах чернозема лесного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерение вибраций корней дуба черешчатого *Quercus robur* L. проводили в искусственной кленово-ясеновой дубраве возрастом 40–45 лет в черте г. Донецка (Украина) в ветреную погоду. Участок расположен в верхней трети склона (8°) северной экспозиции. Тип лесорастительных условий – суглинок суховатый. Увлажнение атмосферное. Высота тестируемого дерева – 7,5 м, диаметр – 0,17 м.

Для сохранения опорной функции от почвы освобождали лишь поверхность корней. Центральный стержень был откопан до глубины 80 см. Корень №1 (диаметр у основания 1,5 см) отходит от центрального под углом 100°, раскопан на 55 см. Корень №2 (диаметр у основания 2 см) отходит от центрального под углом 140°, раскопан на 75 см. Корень №3 (диаметр у основания 4 см) отходит от центрального под углом 170°, раскопан на 90 см.

Коэффициент затухания упругой волны определяли методом тест-удара, широко используемым в технике для контроля вибраций машин. Пружинным ударником осуществляли серию ударов по стволу на уровне 1,3 м, а в нескольких точках на корне регистрировали амплитуду вибрации. Значения основных частот вибраций определяли из спектров мощности.

Для записи осциллограмм вибраций датчик располагали в произвольной точке на корне, а дерево отклоняли на 3° канатом, прикрепленным к стволу на уровне 2/3 высоты дерева. При ветреной погоде регистрировали вибрации, вызванные раскачиванием от действия ветра. В качестве преобразователя механических колебаний в электрический сигнал использовали откалиброванный пьезоэлектрический датчик, выход с которого подавали на осциллоскоп HPS-10 фирмы «Виллеман» (Бельгия) с возможностью записи и хранения измеренных данных. Для получения спектров мощности использовали метод быстрого преобразования Фурье. Вычисления производили в программе «Mathcad 14» фирмы «Mathsoft Engineering & Education».

Модуль упругости и плотность корней определяли описанным ранее способом (Нецветов, 2003), скорость звука рассчитывали по формуле (2), а акустический импеданс – по формуле (4).

Образцы почвы (чернозема лесного) отбирали из разреза, расположенного в липово-ясеновой дубраве в средней трети склона северной экспозиции правого берега р. Самары. Крутизна склона 7–8°, расстояние до р. Самары – 55 м. Тип лесорастительных условий – суглинок свежий (СГ₂). Тип экологической структуры – полутеневой. В древесном ярусе: *Quercus robur* L., *Fraxinus excelsior* L., *Tilia cordata* Mill. Возраст деревьев – 60–65 лет, сомкнутость – 0,8–0,9. Высота деревьев – 15–18 м. Морфологическое описание разреза (№207) сделано Н. А. Беловой (Белова, 1999).

Отбор производили на глубине 0–10 см (He1₁), 20–40 см (He1₂), 40–60 см (Hi1),

70–90 см (Ph), 110–155 (P). Почву помещали в пробирки и увлажняли, затем высушивали при температуре 25–27° до воздушно-сухого состояния. На образцы почвы помещали навеску частиц карбонильного железа с диаметром 5–15 нм. Образцы в пробирках закрепляли на виброустановке. Амплитуда вибрации – 50 ± 10 мкм, частота 100 Гц. В эксперименте регистрировали время, за которое частицы погружались в объем почвенного образца, затем частицы извлекали постоянным магнитом. Для анализа данные переводили в относительные единицы скорости перемещения навески частиц. За единицу принимали максимальное значение скорости в серии повторностей (5–15) на образцах каждого горизонта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 1, затухание амплитуды вибраций отличается для разных корней. Минимальное значение коэффициента затухания вибраций (2,4 Нп/м) характерно для корня №1. По корням №2 и 3 вибрации распространялись с большим затуханием – 3,2 и 4,6 Нп/м соответственно. Такие значения коэффициентов затухания означают, что амплитуда упругой волны уменьшится в ~10 раз, при прохождении по корню №1 и в ~100 раз при прохождении по корню №3. Различия в коэффициентах затухания могут быть связаны с отличиями корней по механическим свойствам либо с полнотой их освобождения от почвы.

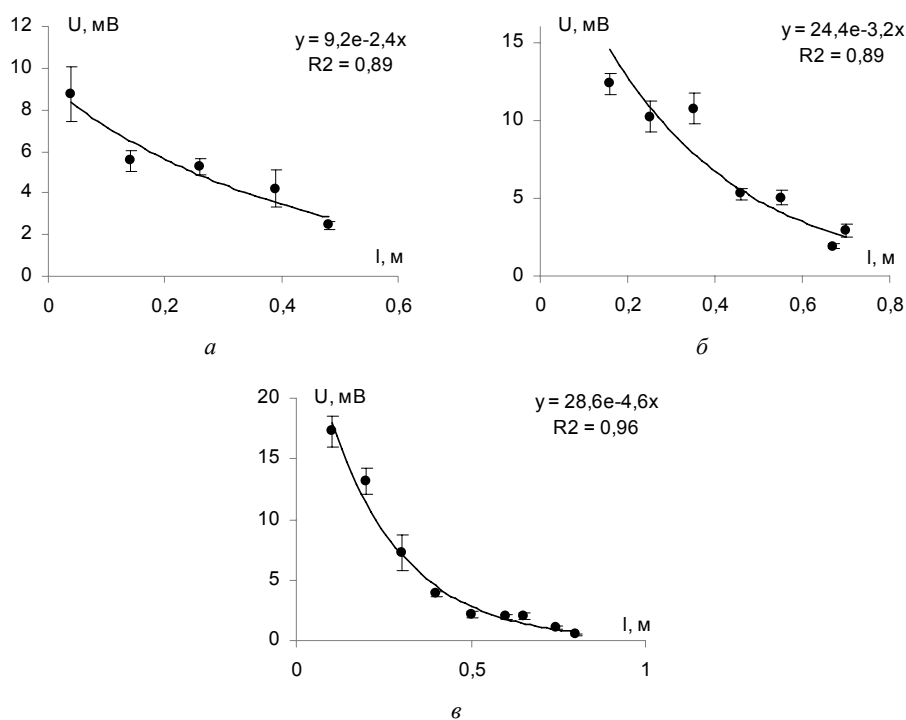


Рис. 1. Затухание амплитуды колебаний корней №1 (а), №2 (б), №3 (в)

Основные частоты вибраций изученных корней лежат в пределах от 20 до 150 Гц. Для центрального корня характерны более высокие частоты вибраций – до 280 Гц. На примере корня №2 рассмотрим, как изменяются спектры по мере распространения вибрации по корню (рис. 2). На расстоянии 16 см от основания корня вибрация характеризуется частотной модуляцией, частоты – 50 (модулирующая) и 100 Гц (несущая). В спектре представлены несколько частот, близких к 100 Гц, но с меньшей амплитудой. При увеличении расстояния от основания к периферии корня до 35 см сигнал так же частотно модулирован, но значения модулирующей и несущей частот сместились до 25 и 85 Гц соответственно. На расстоянии 70 см от основания несущая

частота – ~ 58 Гц, имеются близкие к ней более низкие частоты. Сигнал модулирован по амплитуде, модулирующая частота < 1 Гц – частота качания ствола. Снижение частоты с расстоянием может быть связано с неодинаковым затуханием упругой волны для низких и высоких частот. Таким образом, вблизи места упругой деформации спектр должен быть богаче, чем на значительном расстоянии от него. Возможно, что некоторую долю в нем имеют и частоты 1 кГц и выше. Ультразвуковое излучение регистрируется, по крайней мере, при водном стрессе, когда вода под негативным давлением замещается паром, что сопровождается звуковым ударом в диапазоне 20-300 кГц (Tuge and Sperry, 1989).

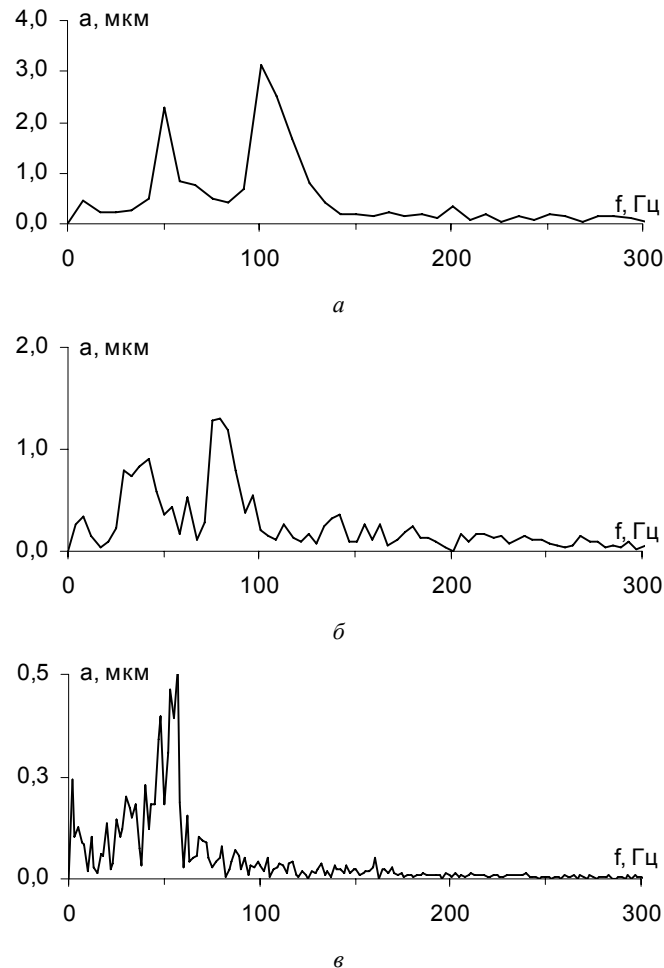


Рис. 2. Амплитудные спектры вибрации корня, вызванной раскачиванием кроны, на расстоянии 16 см (а), 35 см (б), 70 см (в) от его основания

Среднее значение измеренного модуля упругости корней №1 и 2 составило $1,4 \pm 0,34$ ГПа, плотности – $942 \pm 16,2$ кг/м³, рассчитанное значение скорости звука – $1217,5 \pm 153,3$ м/с и волнового импеданса – $11,5 \pm 1,28 \cdot 10^5$ Па·с/м. Используя полученные ранее (Нецветов, 2009) значения волнового импеданса для чернозема ($\sim 1,3 \cdot 10^5$ Па·с/м), по формуле (3) вычисляем, что почве передается около 37 % энергии вибрации корней. На практике это значение может оказаться еще выше при увеличении влажности корня. В качестве иллюстрации можно привести осциллограммы вибраций корня и почвы на расстоянии 0,5 м от него (рис. 3). Как видно, амплитуды обоих сигналов очень близки, вероятно, что почве передается вибрация не только ближайшего корня, но и других корней, а также ствола. Таким образом, существенная часть энергии вибрации корней регулярно передается почве.

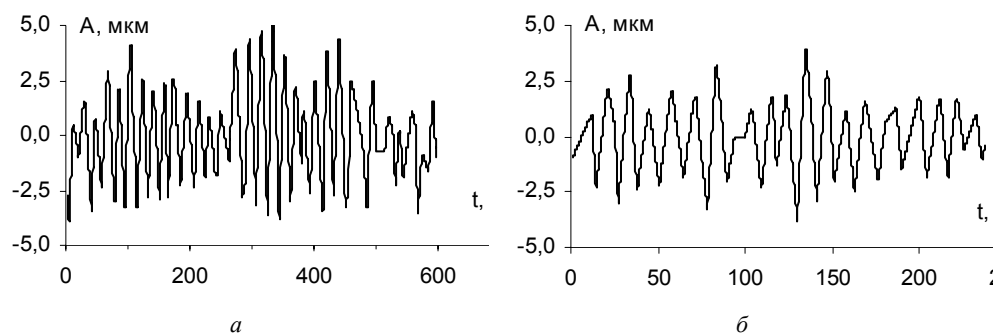


Рис. 3. Осциллограммы вибрации корня (а) на расстоянии 70 см от основания и почвы (б) на расстоянии 0,5 см от корня

Для оценки возможности вибрационного влияния корней на механическое перемещение частиц были проведены лабораторные опыты на образцах чернозема лесного с применением вибрации на частоте 100 Гц с амплитудой 50 ± 10 мкм. Такая амплитуда соответствует зарегистрированной нами максимальной амплитуде вибрации корня от раскачивания кроны при средней скорости ветра до 10 м/с (по данным гидрометеоцентра) – ~60 мкм (на корне №2 в 25 см от ствола).

Как показано на рис. 4, а, максимальная относительная скорость v механического перемещения частиц максимальна в элювиальном горизонте He1. Существенное снижение v происходит в иллювиальном и более глубоких горизонтах. При более детальном изучении зависимости скорости v от глубины h (рис. 4, б) выявляется максимум в горизонте 10-20 см, что, по всей видимости, связано с большим количеством органических остатков, заполняющих поры и трещины, в горизонте 0–10 см. Отчасти это подтверждается высоким коэффициентом корреляции скорости и потери от обработки HCl (по Н. А. Беловой и А. П. Травлеву, 1999). При корреляционном и регрессионном анализе выявлена максимальная связь зависимости v от h с изменением

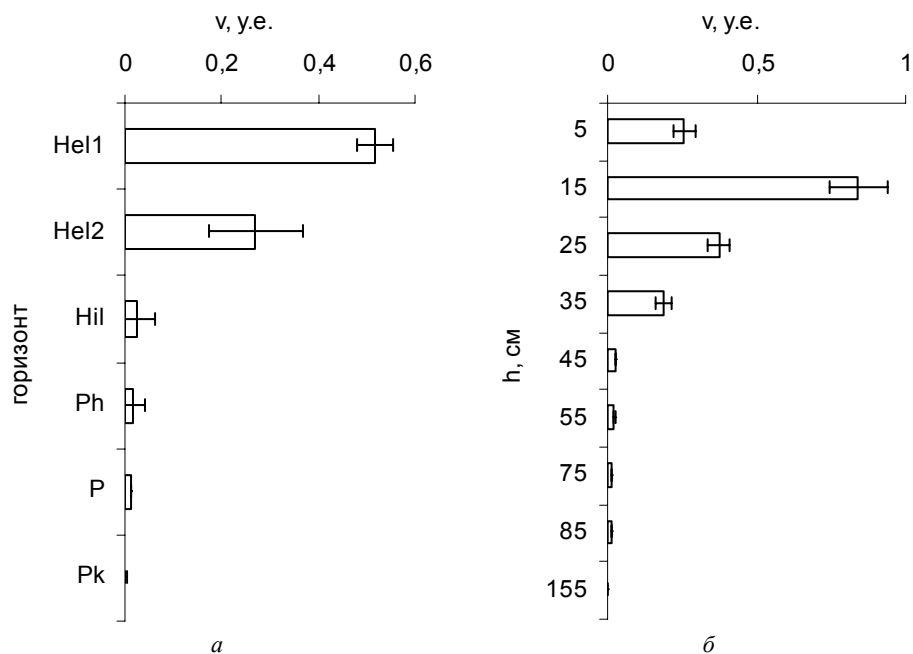


Рис. 4. Зависимость относительной скорости перемещения частиц v от глубины h горизонта чернозема лесного

содержания частиц менее 0,0002 мм в профиле чернозема лесного (рис. 5). Очевидны две причины такой связи. Во-первых, вертикальная миграция частиц, обусловленная комплексом факторов, и вибрационное перемещение модельных частиц в эксперименте затрудняются в силу очевидного физического ограничения – пористости. Оба показателя выявляют высокую корреляцию с общей пористостью: -0,91 и 0,83 соответственно для содержания коллоидов и скорости вибрационного перемещения. Во-вторых, высокое содержание коллоидов само по себе является препятствием для прохождения модельных частиц.

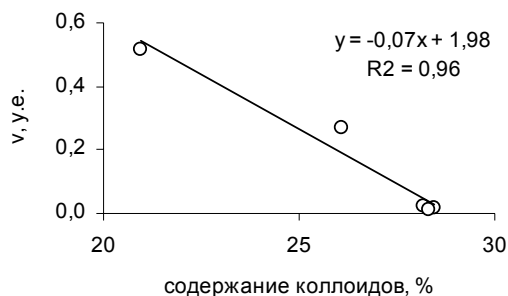


Рис. 5. Зависимость относительной скорости v вибрационного перемещения модельных частиц от относительного содержания почвенных коллоидов

ВЫВОДЫ

Вибрации корней дуба черешчатого, обусловленные раскачиванием надземных частей дерева, распространяются преимущественно на частотах от 50 до 200 Гц с коэффициентом затухания $3,5 \pm 1$ Нп/м. Вибрации от корней передаются почве и лежат в том же диапазоне частот. В черноземе лесном возможно вибрационное перемещение частиц размером менее 1 мкм. Оно ограничено высоким содержанием органического вещества в горизонте 0–10 см и почвенных коллоидов в горизонтах, лежащих глубже 40 см, а также уменьшением общей пористости почвы с глубиной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н. А.** Естественные леса и степные почвы / Н. А. Белова, А. П. Травлеев. – Д.: ДГУ, 1999. – 348 с.
- Данилик В. Н.** Влияние колебаний деревьев на водопроницаемость почвы / В. Н. Данилик, Г. П. Макаренко, О. В. Толкач // Лесоведение. – 1989. – № 1. – С. 40-45.
- Нецветов М. В.** Сверхнизкочастотные колебания *Quercus robur* L. и *Acer platanoides* L. / М. В. Нецветов // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона: Межведомственный сборник научных работ. – Донецк: ДонНУ, 2003. – Вып. 3. – С. 58-62.
- Нецветов М. В.** Вибрационные взаимосвязи дерева и почвы / М. В. Нецветов // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2007. – Вып. 7. – С. 248-254.
- Нецветов М. В.** Эффект увлажнения при вибрационном перемещении частиц в почве / М. В. Нецветов, П. К. Хиженков // Грунтознавство. – 2008 – Т. 9, № 1-2. – С. 114-118.
- Травлеев А. П.** Микроморфология лессиважных процессов в байрачных лесных черноземах степной Украины / А. П. Травлеев, J. M. Recio Espej, Н. А. Белова, Е. В. Кузнецов, А. К. Балалаев, В. Е. Кузнецов // Грунтознавство. – 2007. – Т. 8, № 1-2. – С. 6-24.
- Biddington N. L.** The effect of mechanically-induced stress in plants: a review // Journal of Plant Growth Regulation // 1986. – Vol. 4. – P. 103-123.
- Dupuy L. X., Fourcaud T., Lac P., Stokes A.** A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture // Am. J. Bot. – 2007. – Vol. 94. – P. 1506-1514.
- Hartge K. H., Blassing D., Herklotz K.** Veränderungen des Bodengefüges unter dem Einfluss mehrjähriger Baumwurzeln // Fortwiss. Cbl. – 1983. – Vol. 102. – Pp. 99-110.
- Hintikka V.** Wind-induced root movements in forest trees // Metsäntuki muslaitok julk. – 1973. – Vol. 76, N 2. – P. 1-56.
- Jaffe M. J.** Thigmomorphogenesis: the response of plant growth and development to mechanical stimulation // Planta. – 1973. – Vol. 114. – P. 143-157.

Mitchell C. A., Severson C. J., Wott J. A., Hammer P. A. Seismomorphogenic regulation of plant growth // Journal of the American Society of Horticultural Science. – 1975. – Vol. 100. – P. 161-165.

Quine C. P. In Description of the storm and comparison with other storms // In The 1987 Storm – Impact and Responses. – London, 1989. – P. 3-8.

Read J., Stokes A. Plant biomechanics in an ecological context // Am. J. Bot. – 2006. – Vol. 93. – P. 1546-1565.

Rizzo D. M., Harrington T. C. Root movement and root damage of red spruce and balsam fir on subalpine sites in the White Mountains, New Hampshire // Can. J. For. Res. – 1988. – Vol. 18. – P. 991-1001.

Sell J. Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. – Zurich, 1989.

Tyree M. T., Sperry J. S. Characterization and propagation of acoustic emission signals in woody plants, towards an improved acoustic emission counter // Plant Cell Environ. – 1989. – Vol. 12. – P. 597-599.

Wegst U. G. K. Wood for sound // Am. J. Bot. – 2006. – Vol. 93. – P. 1439-1448.

Wood Handbook: wood as an engineering material. General Technical Report 113. – Madison. – 1999.

Надійшла до редколегії 17.02.09