

---

## ДИАГНОСТИКА ВНУТРЕННЕГО СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ *TILIA CORDATA MILL.* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ «АРБОТОМ<sup>®</sup>»

И.А. Мельничук, Й.М. Йассин Солиман,  
О.А. Черданцева

Кафедра садово-паркового и ландшафтного строительства  
Санкт-Петербургский государственный  
лесотехнический университет им. С.М. Кирова  
Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021

Целью настоящего исследования являлась оценка состояния древесины деревьев *Tilia cordata*, растущих на территориях Летнего сада, Михайловского сада и сада Михайловского (Инженерного) замка г. Санкт-Петербурга, с использованием ультразвуковой томографической аппаратуры «Арботом<sup>®</sup>». Использовалось программное обеспечение 2D (Rinn Tech, Germany). Обследовались 50 деревьев *Tilia cordata*. Были рассмотрены взаимосвязи между возрастом дерева и скоростью распространения ультразвука в его стволе. Получены двумерные изображения сечения ствола дерева, отражающие внутреннее распределение плотности древесины. Предложена методика сравнительной оценки состояния деревьев. Результаты показывают перспективность применения метода акустической томографии для диагностирования внутренних разрушений ствола деревьев.

**Ключевые слова:** деревья, ствол, ультразвуковой томограф, состояние древесины, «Арботом<sup>®</sup>».

В настоящее время для оценки степени внутренних разрушений ствола городских деревьев с различной степенью успеха применяются три различных типа томографии: электрическая, ультразвуковая и с применением георадара [1; 3; 4].

Из трех названных технологий ультразвуковая томография оказалась наиболее эффективным инструментом для выявления внутреннего распада древесины, оценки расположения аномалий, их размеров, формы, а также характеристики механических свойств древесины.

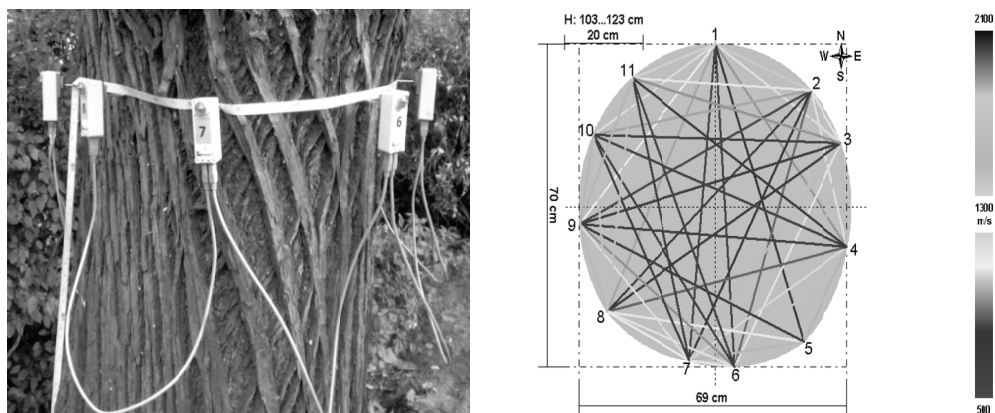
Метод акустической томографии использовался многими исследователями в области изучения разрушения деревьев в условиях города [4—7; 9; 10].

Во всех случаях применение акустической томографии было успешным при выявлении внутренних структурных дефектов древесины и оценке устойчивости больших старых деревьев в городских парках. Акустическая томография является неразрушающим методом визуализации внутренней структуры древесины, основанным на одновременном измерении времени распространения в стволе дерева акустических волн от нескольких датчиков, расположенных вокруг ствола. Аппаратура обеспечивает двухмерное изображение исследуемого сечения, которое иллюстрирует физическое состояние ствола дерева [2; 8]. Акустическая томография была успешно использована для инструментальной количественной оценки распада древесины белого дуба (*Quercus alba*) и гикории (*Carya spp.*).

В настоящей статье изложены результаты использования акустической томографии для обнаружения внутренних дефектов в древесине липы мелколистной *Tilia cordata*.

**Материалы и методы.** Комплекс аппаратуры акустической ультразвуковой томографии «Арботом<sup>®</sup>». «Арботом<sup>®</sup>» представляет собой импульсный томо-

граф, разработанный для проведения анализа состояния внутренней структуры деревьев (рис. 1). Принцип его действия основан на измерениях времени прохождения звуковых импульсов. Скорость прохождения звуковых импульсов тесно коррелирует с плотностью исследуемых тел, что позволяет получить информацию о состоянии материала данного тела. «Арботом<sup>®</sup>» используется для диагностики внутреннего состояния деревьев в целях выявления и определения параметров скрытых стволовых гнилей. Аппаратура разработана и выпускается немецкой фирмой «Rinntech».



**Рис. 1.** Размещение датчиков на стволе деревьев и пути акустических измерений

*Принцип действия комплекса «Арботом<sup>®</sup>».* Принцип действия прибора основан на том, что скорость распространения ультразвукового сигнала в древесине зависит от ее плотности. Участки ствола, затронутые гнилью, имеют меньшую плотность по сравнению со здоровой древесиной. При этом плотность тем ниже, чем выше степень деструкции.

Результаты всех измерений сохраняются в памяти прибора и могут быть перенесены на компьютер. Участки со здоровой древесиной маркируются синим цветом, с гнилью, находящейся на ранней стадии развития — желтым, с развитой стволовой гнилью — красным. Программа автоматически подсчитывает долю различных участков древесины. В качестве излучателей и приемников в приборе «Арботом<sup>®</sup>» используются закрепляемые с внешней стороны ствола, многофункциональные сенсоры (см. рис. 1). Специальное программное обеспечение рассчитывает измеряемые параметры и представляет их на мониторе в виде цветного графического изображения [1; 3].

*Компоненты системы.* В состав комплекса входят: многофункциональные сенсоры (2—24 и более шт.); соединительные кабели; компьютер — ноутбук в опции с радиосвязью; кейс с аккумуляторным модулем для обеспечения бесперебойного питания системы. Совместно с новым модулем «Арборадикс» система способна изучать и выявлять повреждения корневой системы, что увеличивает фактологический материал для точной оценки состояния и жизнеспособности древесной растительности, выявления потенциально опасных деревьев и принятия верных решений по их своевременному удалению или консервативному лечению и укреплению.

Порядок работы с комплексом «Арботом<sup>®</sup>».

1. Закрепить на дереве сенсоры и активизировать в программе необходимые позиции для анализа поступающей информации.
2. Подключить к первому сенсору аккумуляторный модуль, а остальные сенсоры соединить последовательно друг с другом прилагаемыми кабелями.
3. После запуска программы и легкого постукивания по каждому сенсору система начинает работать.
4. Результаты измерения моментально появляются на экране в виде графической картины. Ее можно ввести в память и вывести на принтер для печати.

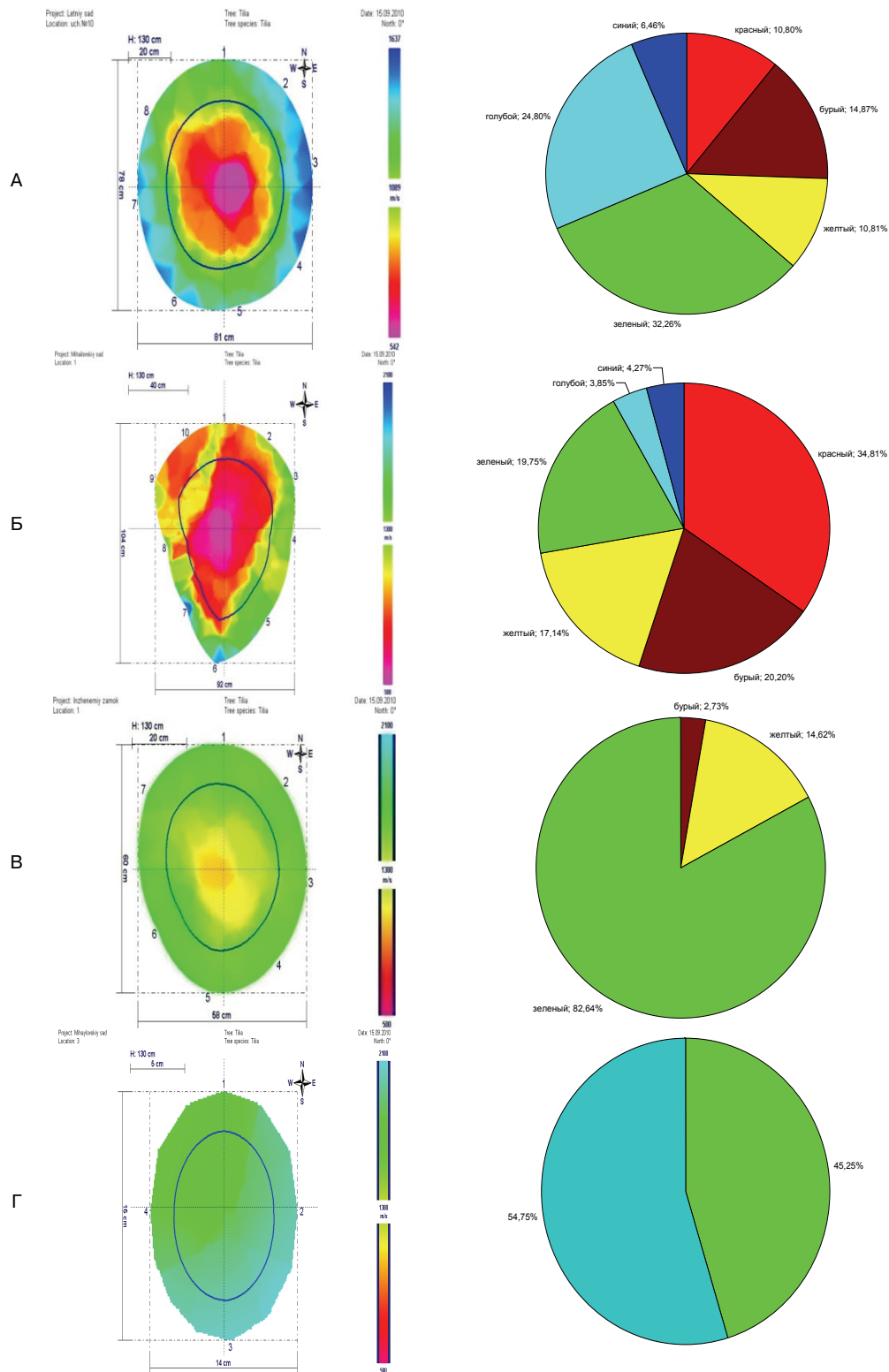
*Выбор деревьев.* Для обследования было отобрано десять деревьев *Tilia cordata* (возраст 12—150 лет) на территории Летнего сада, Михайловского сада и сада Михайловского (Инженерного) замка. Выбор деревьев производился в два этапа: первоначальный отбор и окончательный выбор дерева. Целью процедуры выбора является определение деревьев с различным уровнем внутреннего распада. Для сравнения здоровые деревья были также включены в экспериментальный план.

На рис. 1 показано применение «Arbotom<sup>®</sup>» в тестировании липы мелколистной (*Tilia cordata*) в Летнем саду. Использовался комплект из 4—12 датчиков — в зависимости от диаметра дерева. Все датчики были равномерно размещены вокруг ствола в горизонтальной плоскости. Каждый датчик оснащен акустической антенной в виде стального стержня диаметром 1,5 мм, которая внедрялась в ствол сквозь кору и заболонь. Различия скорости прохождения акустической волны измерялись последовательно после нанесения удара по выводу датчика стальным молотком. Полные данные матрицы были получены в результате повторения процесса измерения в каждом месте.

На рис. 1 показано расположение датчиков и направления акустических измерений. Во время тестирования всех деревьев места крепления датчиков отмечались булавками, длины окружностей и расстояния между датчиками измерялись с помощью мерной ленты. Эта информация была использована в качестве входных данных для последующей обработки программным обеспечением «Arbotom<sup>®</sup>» и формирования карты приближенной геометрической формы сечения. По завершении акустических измерений для каждого сечения была построена томограмма.

**Результаты и обсуждение.** Результаты обработки ультразвукового томографического сканирования стволов деревьев показали наличие дефектов во внутренней структуре древесины и тенденции их развития. Двумерные ультразвуковые томограммы стволов липы мелколистной (*Tilia cordata*) представлены на рис. 2: дерево А — наличие пустот (дупел) в центральной части ствола; дерево Б — наличие пустот (дупел) в северной и западной частях ствола; дерево В — начало разрушения межволоконных связей в центральной части ствола; дерево Г — дефекты в стволе практически отсутствуют (естественная плотность древесины).

На рис. 2 представлены томограммы состояния внутренней части ствола деревьев разного возраста и с различным характером развития внутренних дефектов древесины. На рис. 2 приведены результаты томографирования молодых деревьев: возраст менее 12 лет (Г) и возраст 20 лет (В).



**Рис. 2.** Двумерные ультразвуковые томограммы стволов липы мелколистной (*Tilia cordata*)

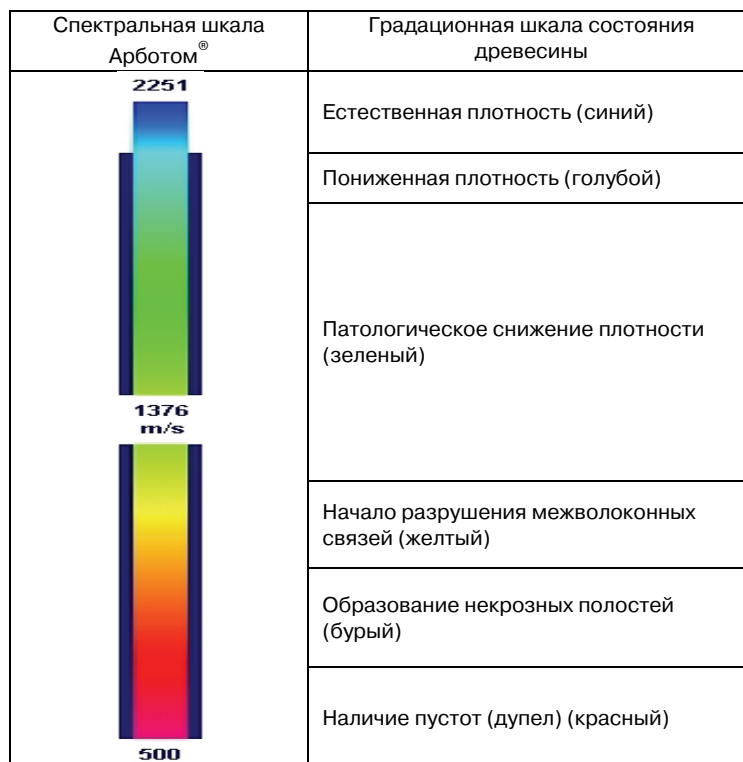
На позиции «Г» мы видим томограмму дерева с естественной ненарушенной внутренней структурой. Однако в северной части ствола заметно снижение плотности древесины, что может быть связано с характерными для ориентации дерева естественными причинами и негативным воздействием антропогенных факторов. На томограмме «В» отображено начало разрушения межволоконных связей в центральной части ствола у растения более старшего возраста, при этом отмечается направление развивающейся деструкции в западной части ствола. Также на рис. 2 представлены результаты исследования старых деревьев возрастом от 100 до 150 лет. У деревьев этого возраста внутренняя часть ствола практически разрушена. Характер такого разрушения у разных деревьев различен. На томограмме «А» внутреннее разрушение древесины наблюдается в средней части ствола и развивается концентрично. Томограмма «Б» отображает наличие пустот (дупел) в северной и западной частях ствола в направлении коры дерева, что в результате приводит к появлению трещин на поверхности ствола.

Томографирование производилось в сечении ствола дерева на высоте 130 см над поверхностью земли (на высоте груди). Самая высокая скорость ультразвука составила 2251 м/с и отмечалась для деревьев в возрасте 12—20 лет. Наименьшая скорость ультразвука составила 500 м/с и отмечалась для деревьев в возрасте 100—150 лет.

**Метод количественной интерпретации результатов ультразвуковой томографии с использованием комплекса «Arbotom®».** С целью обеспечения возможности сопоставления степени внутреннего разрушения древесины у различных растений с использованием результатов ультразвуковой томографии авторами настоящих исследований предложен и практически применен метод количественной обработки цветных томограмм. Метод основан на использовании возможностей компьютерной редакционной программы Adobe Photoshop CS. При обработке цветных томограмм с помощью операционных возможностей программы Adobe Photoshop CS производился подсчет количества пикселей томограммы в областях разной цветовой тональности. Полученное значение сопоставлялось с общим количеством пикселей в цветном отображении результатов томографирования. Полученный результат представлялся в процентном отношении от площади исследуемого сечения дерева для каждой из выбранных зон цветового спектра томограммы.

С целью введения разграничения цветовых зон спектра томографирования авторами предложены шесть выделенных условных областей градации состояния внутренней части древесины, соответствующих определенным диапазонам значений скорости прохождения акустической волны в материале объекта исследований. При разработке условной шкалы такой градации авторы основывались на оценке граничных цветовых характеристик общего цветового спектра комплекса «Arbotom®» (см. рис. 2, шкала справа от томограммы). Крайний верхний участок спектральной шкалы (синего цвета) соответствует максимальной скорости прохождения звуковой волны в неизменной (здоровой) древесине. Крайний

нижний участок спектральной шкалы (красного цвета) соответствует практически нулевой скорости звуковой волны, что свидетельствует о наличии области внутри ствола, не заполненной древесным материалом (дупла). Область, окрашенная в красный цвет, соответствует некоторой минимальной скорости прохождения звука в бесструктурном (рыхлом) материале, скорее всего, в полости, заполненной продуктами разложения погибшей древесины. Соответствие промежуточных цветовых спектральных зон фактическому состоянию древесины определялось методом интерполяции с определенной степенью условности (рис. 3).



**Рис. 3.** Условная градационная шкала для оценки степени внутреннего разрушения древесины

В результате была получена условная градационная шкала, позволяющая выполнить сравнительную оценку состояния древесины различных исследуемых растений с достаточной для поставленных задач точностью. Более точные интерпретации результатов акустического томографирования с помощью предложенного метода возможны после проведения специальных дополнительных исследований, основанных на изучении спилов удаляемых после томографирования растений или их частей.

Результаты обработки полученных данных приведены в таблице.

Наблюдается прямая корреляция состояния внутренней части древесины растений с их возрастом (табл.). Практически все деревья старше 20 лет страдают от внутренних разрушений древесины.

**Результаты обработки данных ультразвуковой томографии деревьев  
в Летнем и Михайловском садах г. Санкт-Петербурга**

| Номер дерева | Возраст деревьев, лет | Естественная плотность, % | Пониженная плотность, % | Патологич. снижение плотн., % | Разрушение межволокон. связей, % | Образование некротических полостей, % | Пустоты (дупла), % |
|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1            | 12                    | —                         | 19,95                   | 54,75                         | —                                | —                                     | —                  |
| 2            | 12                    | —                         | 80,05                   | 45,25                         | —                                | —                                     | —                  |
| 3            | 20                    | —                         | —                       | 82,64                         | 14,62                            | 2,73                                  | —                  |
| 4            | 20                    | —                         | —                       | 81,05                         | 18,95                            | —                                     | —                  |
| 5            | 100                   | 6,46                      | 24,80                   | 32,26                         | 10,81                            | 14,87                                 | 10,80              |
| 6            | 100                   | 13,54                     | 18,12                   | 45,99                         | 6,71                             | 9,75                                  | 5,90               |
| 7            | 100                   | —                         | —                       | 23,50                         | 35,94                            | 25,07                                 | 15,65              |
| 8            | 100                   | —                         | 3,56                    | 29,51                         | 28,29                            | 19,06                                 | 19,58              |
| 9            | 150                   | 0,64                      | 1,89                    | 26,49                         | 10,00                            | 15,66                                 | 42,22              |
| 10           | 150                   | 4,27                      | 3,85                    | 19,75                         | 17,14                            | 20,20                                 | 34,81              |

Большинство исследователей объясняют развитие процесса разрушения древесины в деревьях парковых зон г. Санкт-Петербурга образованием морозобойных трещин, что связывается с высокой влажностью климата в регионе и переувлажненностью почв.

Высокое содержание влаги в стволах деревьев при воздействии отрицательных температур приводит к ее замерзанию, вызывающему разрушение древесины. Возможно, что данное обстоятельство необходимо учитывать при подборе видового состава деревьев, высаживаемых в городских зонах озеленения г. Санкт-Петербурга, и разработке специальных агротехнических мероприятий. В целом состояние деревьев старше 100 лет в исторических садово-парковых ансамблях следует признать неудовлетворительным. Большинство молодых деревьев исследованного вида имеют признаки начальной фазы разрушения внутренней части ствола от сердцевины. В дальнейшем развитие разрушения происходит либо концентрично, либо по направлению к внешней части дерева, что в конечном итоге приводит к возникновению трещин на стволе дерева. Такие деревья требуют соответствующей обработки пораженных участков.

### **Выводы**

На основании экспериментальных данных, проведенных в настоящей работе, могут быть сделаны следующие выводы.

1. Применение акустической томографии с использованием «Arbotom®» позволило получить данные о структурных дефектах на обследованных деревьях.

2. В деревьях, обследованных томографом, точно выявлено местонахождение дефекта.

3. Разница в цвете и скорости ультразвука между областью расположения дефекта и здоровой древесиной была очевидна.

4. На основании полученных результатов обследования можно проводить точную диагностику состояния дерева и назначать оздоровительные мероприятия.

4. Обследование деревьев томографом не является травматичным по сравнению с традиционным методом взятия керна.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Arbotom Manual — Three-dimensional Impulse Tomograph for Examination of Trees and Timber. — Rinntech, Germany, 2005.
- [2] Bucur V. Nondestructive characterization and imaging of wood // Springer Series in Wood Science. — 2003. — P. 181—214.
- [3] Cheng-Jung Lin, Yu-Chien Kao, Ta-Te Lin, Ming-Jer Tsai, Song-Yung Wang, Lang-Dong Lin, Ya-Nan Wang, Ming-Hsun Chan. Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees // International Biodeterioration & Biodegradation. — 2008. — 62. — P. 434—441.
- [4] Divos E., Szalai L. Tree evaluation by acoustic tomography. — Proc. of the 13th International Symp. on Non-destructive Testing of Wood. — Aug. 19—21, Berkeley, CA, 2002.
- [5] Gilbert E.A., Smiley E.T. Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.) // J. Arb. — 2004. — 30. — P. 277—281.
- [6] Nicolotti G., Socco L.V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees // Journal of Arboriculture. — 2003. — 29. — P. 66—78.
- [7] Socco L.V., Sambuelli L., Martinis R., Comino E., Nicolotti G. Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees // Research in Nondestructive Evaluation. — 2004. — 15 (1). — P. 31—58.
- [8] Wang X., Divos E., Crystal P., Brashaw B.K., Ross R.J., Pellerin R.E. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools. A guide for use and interpretation. — Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. — USDA, Forest Service, Forest Products Lab., Madison, WI., 2004.
- [9] Wang X., Wiedenbeck J., Ross R.J., Forsman J.W., Erickson J.R., Pilon C., Brashaw B.K. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. — Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. — USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, USA, 2005.
- [10] Wang X., Allison R.B., Wang L., Ross R.J. Acoustic tomography for decay detection in red oak trees. — Research Paper FPL-RP-642. — USDA, Forest Service, Forest Products Lab., Madison, WI, 2007.

## **DIAGNOSIS OF THE INTERNAL STATE OF THE *TILIA CORDATA* TREES USING COMPLEX ACOUSTIC ULTRASONIC IMAGING ARBOTOM®**

**I.A. Melnichuk, I.M. Iassin Soliman,  
O.A. Tcherdantzeva**

Department of park and garden construction  
Saint Petersburg State Forest Technical University S.M. Kirov  
*Institutsky per., 5, St. Petersburg, Russia, 194021*

The purpose of this study to identify internal structural defects hidden from view within tree trunks and probability internal decay in standing trees *Tilia cordata* in Summer, Garden Mikhailovsky Garden and Garden of the (Engineers' Castle) using an ultrasonic tomographic technique (Arbotom®). Ten *Tilia cordata* trees were examined with an ultrasonic instrument Arbotom 2D software (Rinn Tech, Germany). Were examined The interrelationships between the age of a tree, the ultrasonic velocity. Two-dimensional images of the tree samples were constructed using (Arbotom® software). The results show very promising possibilities of applications these techniques.

**Key words:** trees, trunk, ultrasonic tomographic, wood condition, «Arbotom®».