

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СТВОЛОВ *PINUS SYLVESTRIS L.*

доктор сельскохозяйственных наук **Е.М. Рунова**

кандидат технических наук **И.А. Гарус**

аспирант **А.Н. Мухачева**

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, Российская Федерация

Оценка состояния качества стволовой древесины в условиях городской среды является актуальной в связи с тем, что деревья, поваленные при усиленной ветровой нагрузке, причиняют огромный ущерб городскому хозяйству, приводят к человеческим жертвам. Целью исследований являлась оценка жизнеспособности растущих деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) с использованием методов импульсной томографии и измерения сопротивления сверлению. Исследования проводились в участках хвойного леса, включенных в застройку при строительстве города. Для исследования ствола методом импульсной томографии использовалось оборудование немецкой фирмы RINNTECH – Arbotom®. Для оценки относительной плотности стволовой древесины использовался метод сверления с использованием прибора Resistograph® 4450. Всего было обследовано 20 модельных деревьев: по 10 деревьев на 2 опытных площадках. Для каждого дерева составлялось инструментально-визуальное описание: определялись высота, диаметр, обхват ствола у шейки корня и на высоте груди; визуально определялись форма и протяженность кроны, форма ствола, наличие видимых пороков ствола. На основании данных инструментального исследования качества стволовой древесины сосны обыкновенной в возрасте 60-70 лет в условиях интенсивного воздействия промышленных выбросов и рекреационной нагрузки установлено, что средняя скорость прохождения звукового импульса в древесине исследованных модельных деревьев колеблется в диапазоне 1003-1349 м/с. В структуре распределения плотности четко определяются зоны локальных деструкций древесины. Сравнение результатов, полученных двумя различными методами оценки состояния древесины на одном объекте, показывает высокую степень сопоставимости. Параллельное использование двух измерительных приборов при оценке состояния растущего дерева повышает точность полученных данных и позволяет с большей достоверностью определить аварийные деревья, области их максимальной деструкции и, как следствие, наиболее вероятное направление падения.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, импульсная томография, сопротивление сверлению, состояние древесины ствола, резистограмма

## APPLICATION OF INSTRUMENTAL METHODS IN TRUNKS ASSESSMENT OF *PINUS SYLVESTRIS L.*

DSc (Agriculture) **E.M. Runova**

PhD (Engineering) **I.A. Garus**

post-graduate student **A.N. Mukhacheva**

FSBEI HE "Bratsk State University", Bratsk, Russian Federation

### Abstract

Assessment of stem wood quality in urban environment is relevant due to the fact that trees felled under increased wind load cause enormous damage to the city economy and lead to human losses. The aim of the study was to assess the viability of growing Scotch pine (*Pinus sylvestris L.*) trees using pulsed tomography and drilling resistance measurements. Research in coniferous forest plots included the development during the construction of the city.

Arbotom® equipment of the German company RINNTECH was used to study the trunk by pulsed tomography. Drilling method was used (Resistograph® 4450 device) to estimate the relative density of the stem wood. A total of 20 model trees were examined: 10 trees each on 2 test plots. An instrumental-visual description was compiled for each tree: height and diameter, girth of the trunk at the root neck and at breast height, the shape and length of the crown, the shape of the trunk, the presence of visible defects in the trunk were visually determined. It was found that the average speed of sound pulse in the wood of the studied model trees fluctuates in the range of 1003-1349 m/s. The research based on the data of instrumental study of the quality of stem wood (Scots pine) at the age of 60-70 under the conditions of intense exposure to industrial emissions and recreational load. Zones of local wood destruction have been clearly defined in the structure of the density distribution. Comparison of the results (obtained by two different assessment methods of wood state at the same object) shows high degree of comparability. The parallel use of two measuring instruments in assessing the growing tree state increases the accuracy of the obtained data and enables more reliable determination of emergency trees, areas of their maximum destruction and, as a consequence, the most probable direction of tree fall.

**Keywords:** Scots pine, impulse tomography, drilling resistance, stem wood condition, resistogram

### Введение

Цель работы: изучить состояние модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с использованием методов импульсной томографии и измерения сопротивления сверлению, оценить сопоставимость результатов и необходимость комбинирования методик для осуществления оценки жизнеспособности растущих деревьев.

Место проведения исследования: город Братск Иркутской области, жилой район Энергетик, участки хвойного леса, включенные в застройку при строительстве города (рис. 1). С учетом ценности городских древесных насаждений, затруднительности их замены и повышенной внешней нагрузки на них перспективным представляется развитие и внедрение неинвазивных или минимально инвазивных методов оценки качества древесины [3, 5–7].

Метод оценки сопротивления сверлению нельзя отнести к неинвазивным, так как происходит практически сквозное проникновение сверла в толщу ствола, однако риск развития негативных последствий при таком вмешательстве значительно ниже, чем при взятии керна.

Точность определения положения структурных элементов в древесине при использовании акустической томографии уступает оборудованию на основе методов сверления. Однако позволяет при этом дать более полную картину расположения элементов относительно друг друга в плоскости.

На данный момент применение акустической томографии является наиболее перспективным из инструментальных методов контроля дре-

весины для ценных растений. Опубликованные в настоящее время исследования, на основе использования ARBOTOM® немногочисленны [8–10, 13, 15]. Для расширения применения методики необходимо формирование информационной базы типовых значений для здоровой древесины различных видов и дефектов различной природы [4, 11, 12, 14].



Рис. 1. Местоположение пробных площадок (по данным сайта <http://maps.fsc.ru/>)

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны модельные деревья *Pinus sylvestris* L. (сосны обыкновенной), входящие в состав городских зеленых насаждений. Деревья имеют естественное происхождение, они были включены в городскую среду при строительстве города в 1955 г., средний возраст деревьев составляет 60-80 лет [2].

Всего было обследовано 20 модельных деревьев: по 10 деревьев на 2 опытных площадках.

Для каждого дерева составлялось инструментально-визуальное описание: с помощью высотомера – эклиметра определялась высота; с помощью мерной ленты определялся обхват ствола у шейки корня и на высоте груди; визуально определялись форма и протяженность кроны, форма ствола, наличие видимых пороков ствола.

Для оценки внутреннего состояния древесины использовались инструментальные методы неразрушающего контроля древесины – метод импульсной томографии и метод микросверления.

Для исследования ствола методом импульсной томографии использовалось оборудование немецкой фирмы RINNTECH – Arbotom®. Для проведения измерения Arbotom® по периметру ствола в одной плоскости на равном расстоянии друг от друга были размещены последовательно соединенные вибродатчики (рис. 1). Стандартным расстоянием между датчиками было принято 10 см, минимальное число датчиков составляло 9-10 шт. В случае если обхват ствола в плоскости измерения составлял менее 90 см, расстояние между датчиками сокращалось [3, 13, 14]. Измерения проводились на высоте 120-145 см. После нанесения удара по датчикам информация о скорости прохождения импульса между ними фиксировалась специальным

программным обеспечением производителя. Для снижения вероятности случайной ошибки по каждому датчику наносилось три последовательных удара равной силы. В случае превышения стандартным отклонением значения 10 % проводились дополнительные удары по датчикам. Программное обеспечение RINNTECH позволило представить полученные результаты в виде матричных значений и в виде двумерных графиков (томограмм).

Следующим этапом являлось получение данных методом сверления с использованием прибора фирмы RINNTECH – Resistograph® 4450 (рис. 2). Принцип действия прибора основан на определении сопротивления древесины сверлению. Для снижения повреждений объекта исследования в конструкции Resistograph® используется ультратонкое сверло. В процессе измерения Resistograph® в режиме реального времени выводит график изменения сопротивления в масштабе 1:1. Измерения проводились в той же плоскости, что и измерения Arbotom®.

В табл. 1 приведены таксационные показатели шести наиболее характерных для пробных площадок деревьев.



Рис. 2. Применение Arbotom® (слева) и Resistograph® (справа)  
(фото авторов)

Таксационная характеристика модельных деревьев\*

№	Возраст дерева, лет	Высота ствола, м	Средний общий прирост по высоте, м/год	D <sub>1,3</sub> , см	Средний общий прирост по диаметру на высоте 1,3м, см/год	D <sub>осн</sub> , см	Средний общий прирост по диаметру у основания ствола, см/год	Примечание
Площадка № 1								
1.2	67	24.2	0.36	35.3	0.53	40.6	0.61	Искривление ствола, асимметрия кроны
1.7	69	23.1	0.33	35.5	0.51	40.0	0.58	Ствол прямой, крона разветвленная
1.9	72	21.5	0.30	34.1	0.47	36.7	0.51	Ствол слегка искривлен, асимметрия кроны
Среднее	69.3	22.9	0.33	34.9	0.50	39.0	0.57	
Площадка № 2								
2.3	68	19.3	0.28	26.3	0.39	29.4	0.43	Ствол искривлен, сильная асимметрия кроны
2.8	62	21.4	0.34	18.5	0.30	21.3	0.34	Искривление ствола
2.9	64	19.2	0.30	24.3	0.38	28.0	0.44	Легкое искривление ствола, сухобокость
Среднее	64.7	19.7	0.31	23.0	0.37	26.2	0.40	

\* собственные данные авторов

Тип леса установить невозможно, так как живой напочвенный покров или совсем отсутствует, или антропогенно изменен (преобладают злаки). На площадке 2 древостой угнетен в большей степени, чем на площадке 1, о чем свидетельствуют значения средних таксационных показателей и показателей среднего общего прироста. Деревья на второй площадке подвержены сильной антропогенной нагрузке, почва сильно уплотнена, вытоптан живой напочвенный покров, оголена корневая система растений. Все исследованные модельные деревья относятся к приспевающим деревьям. Большинство деревьев имеет наклон ствола и асимметрию кро-

ны. Часто наблюдаются видимые пороки ствола – сухобокость, механические повреждения.

В качестве примера на рис. 3-8 приведены результаты исследования шести деревьев.

На томограмме (рис. 3) указана высота закрепления датчиков (130 сантиметров от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 35,5 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения

импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с. Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан

диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. По резистограмме и томограмме можно сделать вывод о достаточно хорошем состоянии дерева, однако намечается некоторое понижение плотности (до 70,6%). В центре дерева отмечается повышение плотности ствола, что, возможно, связано с наличием сучка или трещины.

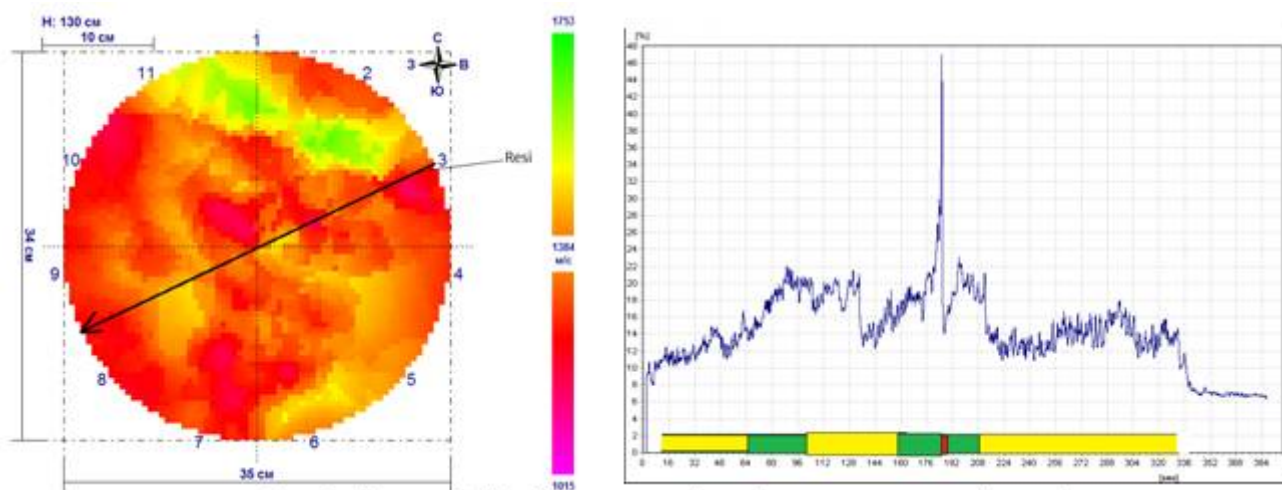


Рис. 3. Дерево № 1.2 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)

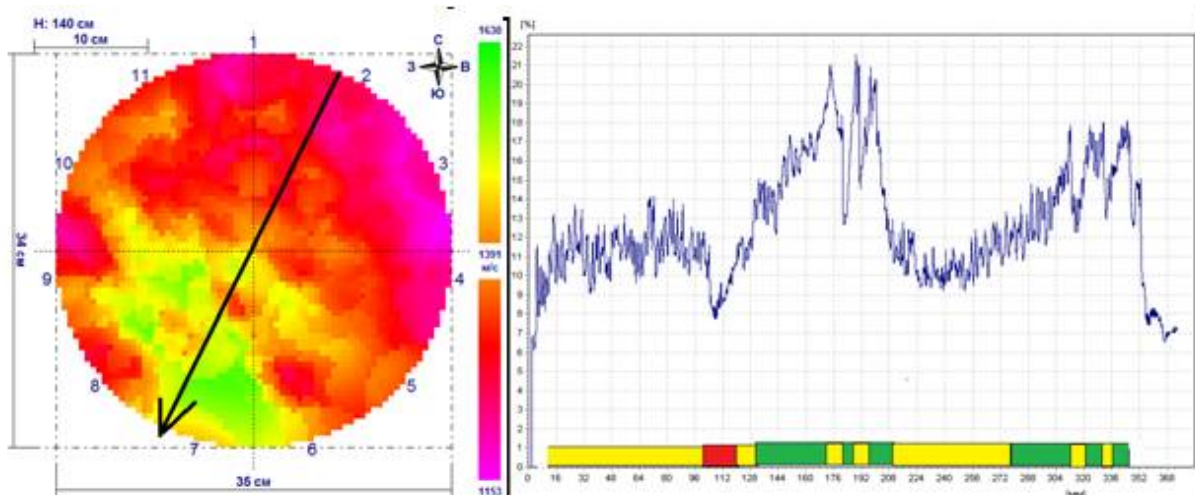


Рис. 4. Дерево № 1.7 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)

На томограмме (рис. 4) указана высота закрепления датчиков (140 см от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 34,5 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с.

Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. Выявлен участок со значительным понижением плотности древесины, а также значительный процент (69,3 %) древесины со слабым понижением прочности.

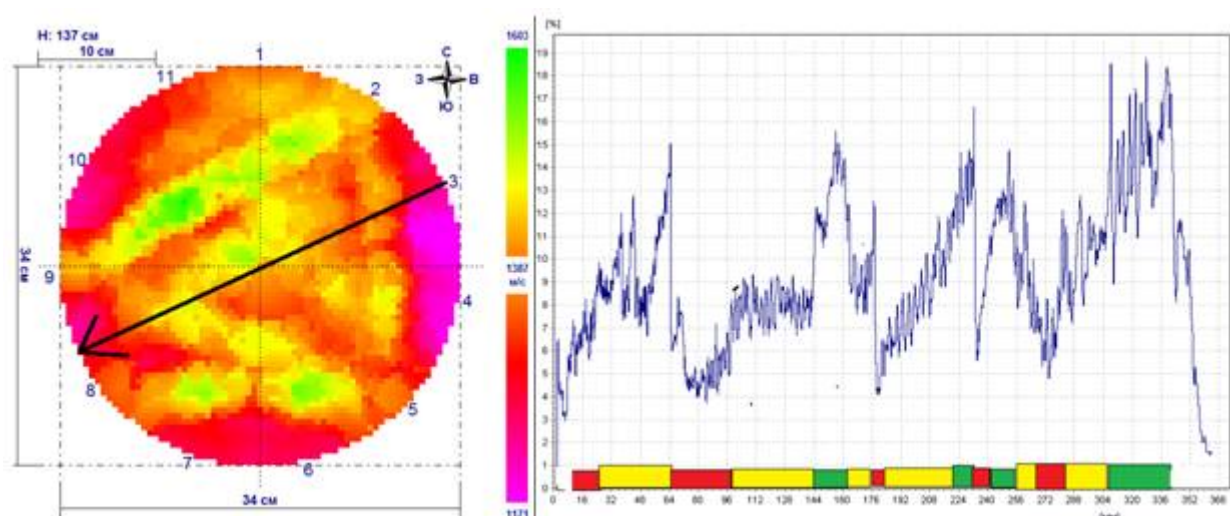


Рис. 5. Дерево № 1.9 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)

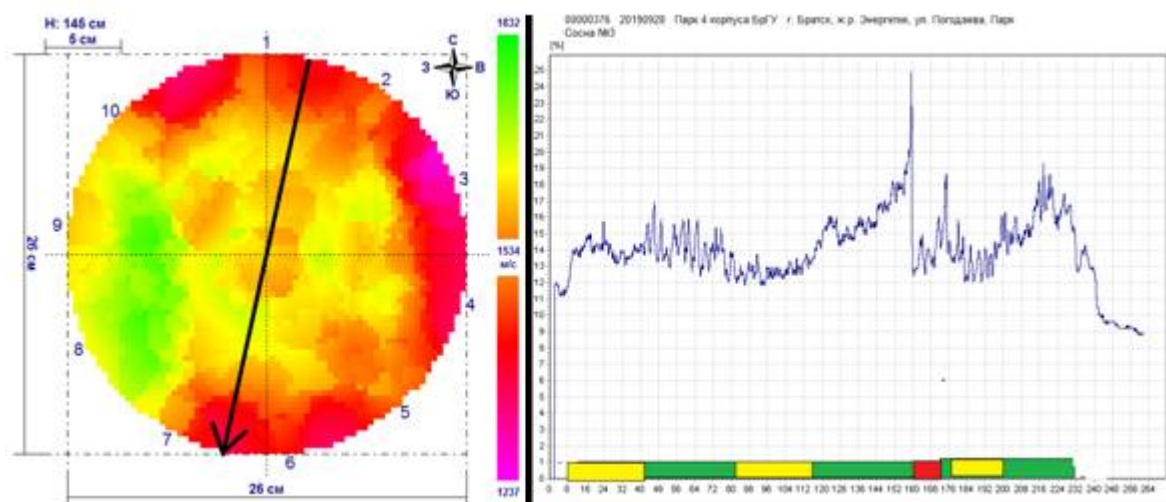


Рис. 6. Дерево № 2.3 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)

На томограмме (рис. 5) указана высота закрепления датчиков (137 см от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 34,0 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с. Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. Выявлен участок со значительным понижением плотности древесины, а также значительный процент (70,5 %) древесины со слабым понижением прочности. Дерево представляет существенную опасность при ветровых нагрузках.

На томограмме (рис. 6) указана высота закрепления датчиков (145 см от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 26,0 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с. Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. Выявлен небольшой участок со значительным понижением плотности древесины, а также значительный процент древесины со слабым понижением прочности.

На томограмме (рис. 7) указана высота закрепления датчиков (140 см от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 18,0 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с. Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. Выявлен участок со значительным понижением плотности древесины (28,6 %), а также значительный процент (43,4 %) древесины со слабым понижением прочности в различных частях дерева.

На томограмме (рис. 8) указана высота закрепления датчиков (120 см от основания дерева), а также толщина ствола по направлениям сторон света (средняя толщина 24,5 см); цветовые оттенки показывают скорость распространения звука (зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине). По оси ординат указана цветовая шкала скорости прохождения звука в м/с. Стрелкой показано направление сверления резистографом. На резистограмме желтым цветом отмечено незначительное снижение плотности древесины, зеленым цветом – нормальная плотность древесины, красным – пониженная плотность древесины. По оси ординат на резистограмме указан диаметр дерева в мм, по оси абсцисс – относительная плотность древесины в процентах. Выявлено несколько участков со значительным понижением плотности древесины (31,3 %), а также участки древесины со слабым понижением прочности, чередующиеся с участками здоровой древесины.

Программное обеспечение Arbotom® не имеет стандартизированной градуировочной шкалы. Все полученные в рамках одного измерения значения распределяются от максимального к минимальному, формируя «плавающую» шкалу. При широкой амплитуде значений зеленый цвет характеризует более высокую скорость распространения

импульса, желтый цвет соответствует средней скорости, фиолетовый цвет характеризует замедленную скорость прохождения импульса по древесине. При однородном распределении плотности в стволе изображение формируется в диапазоне средних значений (желто-оранжевый сектор).

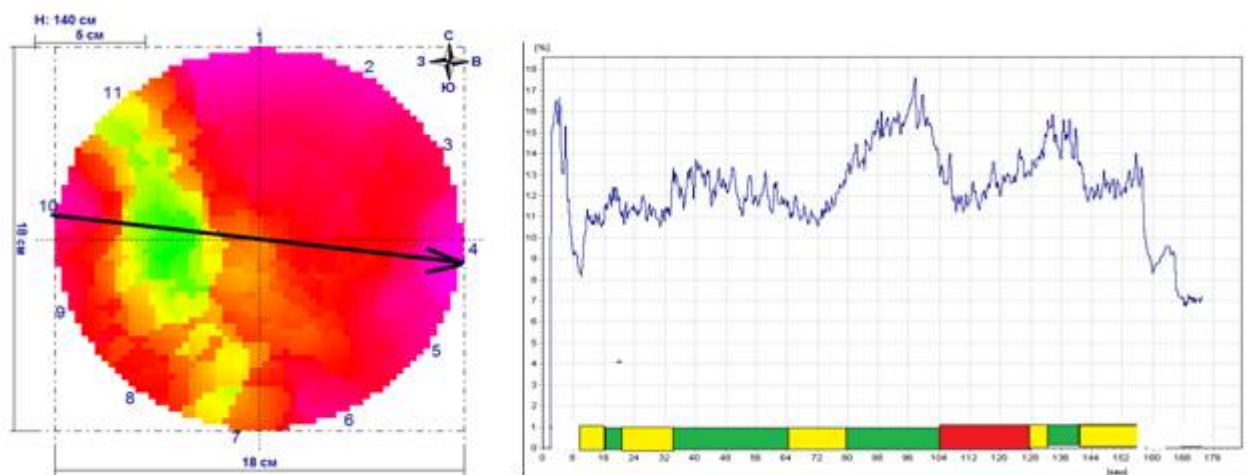


Рис. 7. Дерево № 2.8 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)

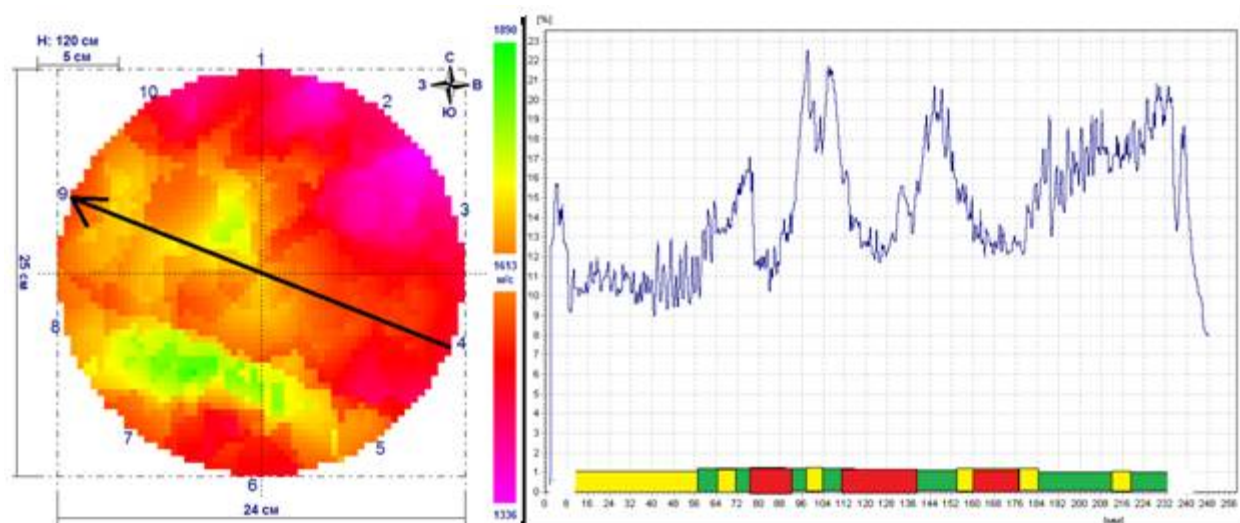


Рис. 8. Дерево № 2.9 – томограмма (слева) и резистограмма (справа)  
(собственные данные авторов)



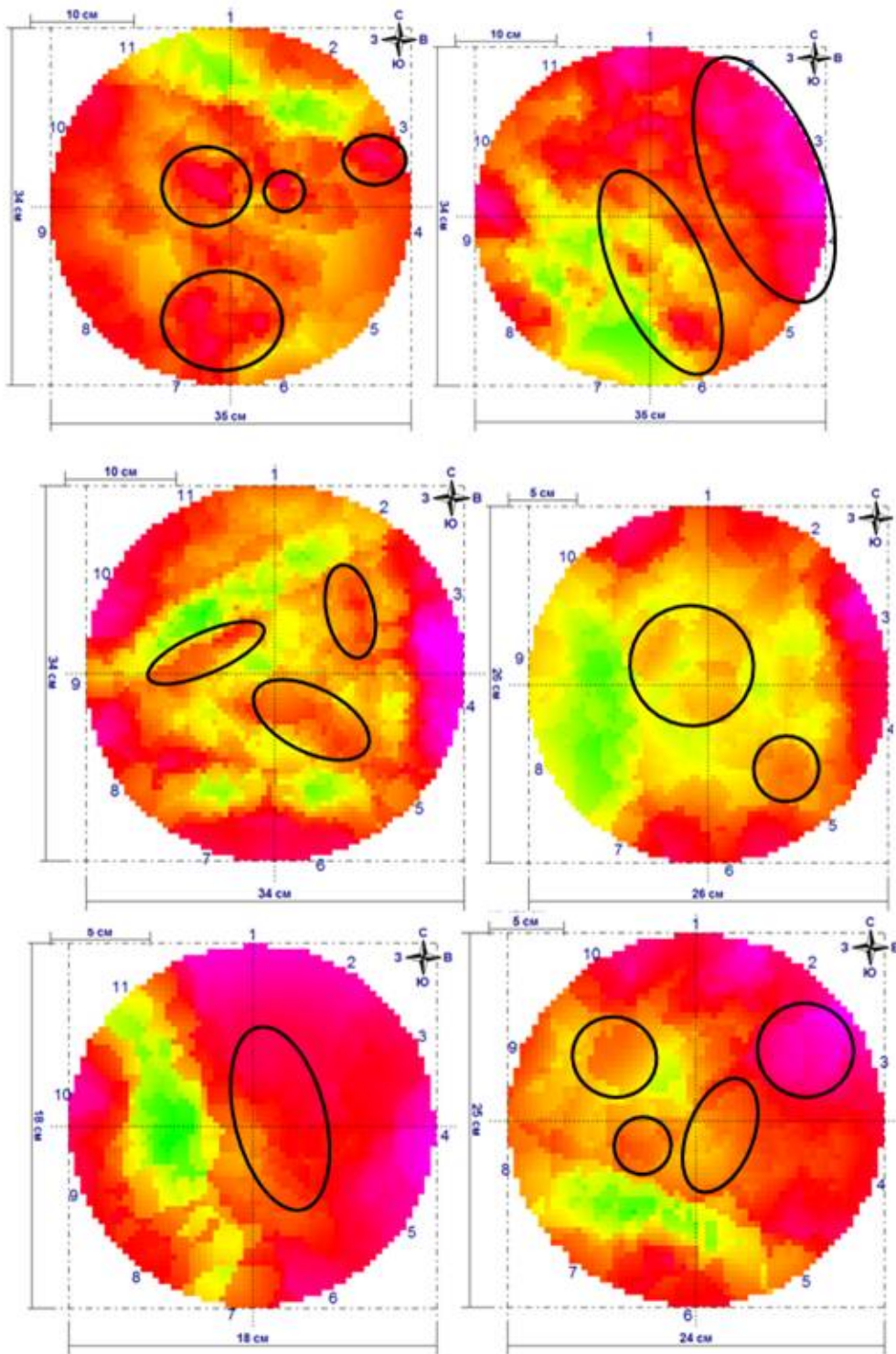


Рис. 9. Локализация внутренних разрушений древесины на томограммах (собственные данные авторов)

Отсутствие стандартизированной градуировочной шкалы, однозначно связывающей значения скорости прохождения импульса через древесину *Pinus sylvestris* L. с ее плотностью, означает невозможность прямой интерпретации томограмм на основании цветового восприятия. Цветовое распределение необходимо анализировать с учетом соотношения максимума и минимума со средним значением для породы, схемы распределения плотности по сечению ствола и ее однородности.

Характер полученных томограмм говорит о неоднородном распределении плотности древесины изученных модельных деревьев. Значения скорости прохождения варьируются от 912 м/с до 2018 м/с. Высокая неоднородность исследуемых образцов, вероятнее всего, вызвана наличием участков древесины с пониженной плотностью, механических повреждений естественной структуры древесины, повышенной нагрузки вследствие деформации ствола. Максимальная частота встречаемости приходится на диапазон значений 1031-1339 м/с (65 %) для площадки № 1 и 1028-1362 м/с (58 %) для площадки № 2. Совокупно по двум площадкам 66 % значений попадают в диапазон 1003-1349 м/с. Данные результаты ниже средних значений, полученных в аналогичных исследованиях [3], что говорит об общем снижении прочности древесины. Это может являться следствием высокой антропогенной нагрузки на зеленые насаждения селитебных территорий.

Исходя из картины распределения плотности древесины по сечению ствола можно сделать вывод об отсутствии в исследуемых образцах развитой гнили с сильным понижением плотности древесины, наличием деструктивных изменений в стволе, однако во всех рассмотренных случаях можно предположить наличие локальных зон с пониженной плотностью древесины, свидетельствующей о наличии гнили в стволах с пониженной плотностью (рис. 9).

Для анализа резистограмм также применяется цветовая схема: зеленым цветом выделена зона здоровой древесины, желтым цветом выделена начальная стадия деструкции, красным цветом выделена зона сильной развитой деструкции. По оси ординат показаны значения относительной плотности древесины, по оси абсцисс – диаметр исследуемого дерева в сантиметрах. На резистограммах хорошо заметны отличия относительной плотности ранней и поздней древесины годовичных слоев. Как видно из рис. 3-8, все исследованные модельные деревья имеют зоны внутренней деструкции. По форме проявления все видимые на резистограммах дефекты можно подразделить на локальные «разрывы» плотности (вероятно прохождение сверла через отлупные трещины между годовичными слоями) и общую деструкцию древесины (зоны развивающейся гнили). Примеры приведены на рис. 10.

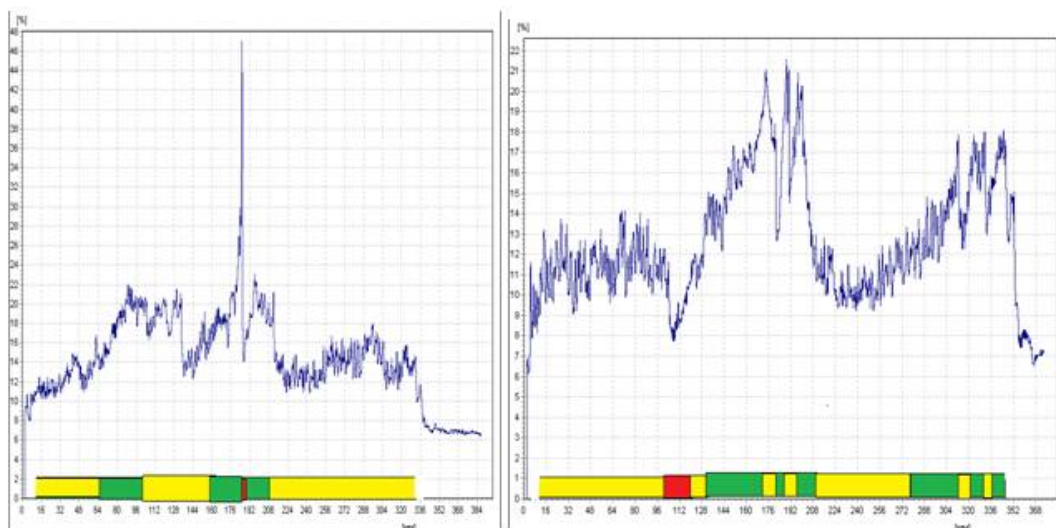


Рис. 10. Участки предполагаемых трещин и гнилей  
(собственные данные авторов)

При наложении графика резистограммы на плоскостной график томограммы можно проследить их частичное совпадение. На рис. 3, 5 и 7 можно наблюдать смещение локализации деструкции на двух графиках относительно друг друга. С учетом методологических основ применяемого оборудования можно сделать предположение о наличии погрешности в определении точного распределения плотности при использовании метода импульсной томографии.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в условиях урбоэкосистем (повышенный уровень загрязнения, высокая степень уплотнения почвы, отсутствие характерного для леса живого напочвенного покрова, большое количество механических повреждений ствола) деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), оказавшиеся в черте городской застройки, со временем теряют свою устойчивость и к возрасту 60-80 лет проявляют признаки старения и естественного отмирания. В естественных условиях продолжительность жизни сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) составляет 350-600 лет [1], таким образом, продолжительность жизни сосны в городских условиях сокращается примерно в 3-5 раз по сравнению с естественными условиями леса. Предложена методика сопоставления результатов двух инструментальных измерений качества стволовой древесины сосны обыкновенной с использованием малоинвазивных технологий, проводимых одновременно на одних и тех же участках ствола модельных деревьев. Выявлены зоны локализации внутренних деструкций древесины на томограммах с использованием прибора Arbotom®.

### Заключение

На основании данных инструментального исследования качества стволовой древесины сосны обыкновенной в возрасте 60-70 лет в условиях интенсивного воздействия промышленных выбросов и рекреационной нагрузки можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные модельные деревья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) имеют внешние пороки ствола, которые видны при визуальном обследовании деревьев (сухобокость, механические повреждения, наклон кроны). Проведен-

ные исследования показали наличие у всех деревьев внутренних пороков, которые подтверждаются данными полученных томограмм и резистограмм. Состояние древесины свидетельствует о начале развития гнили и снижении устойчивости деревьев при ветровой нагрузке. При этом возраст деревьев не является критическим для биологических особенностей сосны обыкновенной (60-70 лет), сосна имеет продолжительность жизни в лесу 350-600 лет, но отсутствие насаждения, лесной среды, техногенная и рекреационная нагрузка сокращают продолжительность жизни городских деревьев сосны примерно в 3-5 раз.

2. Существенная разность значений скорости прохождения импульса в стволовой древесине говорит о неоднородном распределении плотности древесины по сечению ствола. Средняя скорость прохождения звукового импульса в древесине исследованных модельных деревьев колеблется в диапазоне 1003-1349 м/с. В структуре распределения плотности визуально определяются зоны локальных деструкций древесины. На основании данных полученных томограмм можно сделать вывод об общей угнетенности древесной растительности рассматриваемых пробных площадок, наличии внутренних пороков.

3. Большая амплитуда колебаний средних значений резистограмм, наличие «разрывов» в динамике графика отражает неоднородную плотность древесины, наличие внутренних пороков.

4. Сравнение результатов, полученных двумя различными методами оценки состояния древесины на одном объекте, показывает достаточную степень сопоставимости.

5. Параллельное использование двух измерительных приборов при оценке состояния растущего дерева повышает точность полученных данных и позволяет с большей достоверностью определить аварийные деревья, области их максимальной деструкции и, как следствие, наиболее вероятное направление падения.

6. В дальнейшем планируется сравнить полученные данные с данными фоновых участков леса, не ослабленных техногенными и рекреационными нагрузками.

## Библиографический список

1. Булыгин, Н. Е. Дендрология / Н. Е. Булыгин, В. Т. Ярмишко. – Москва : Изд-во МГУЛ, 2002. – 528 с.
2. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2017 году / А. В. Крючков, Н. Г. Абарина, Е. Ю. Коновалова [и др.]. – Иркутск : Мегаринт, 2018. – 249 с.
3. Импульсно-томографная диагностика стволов в городских условиях на примере липы мелколистной / И. К. Латухина, Н. А. Бабич, А. М. Антонов, Н. О. Пастухова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2016. – № 7 (118). – С. 36–40.
4. Мельничук, И. А. Диагностика внутреннего состояния деревьев *Tilia cordata* Mill. с использованием комплекса аппаратуры акустической ультразвуковой томографии АРБОТОМ® / И. А. Мельничук, М. Й. С. Йассин, О. А. Черданцева // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. – 2012. – № 5. – С. 25–32.
5. Рунова, Е. М. Комплексная оценка экологического состояния древесных растений урбоэкосистемы Братска по интегральному показателю устойчивости / Е. М. Рунова, И. И. Гаврилин, М. К. Гаврилина // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. 30. – № 3-4. – С. 312–315.
6. Рунова, Е. М. Инструментальная оценка состояния городских посадок тополя бальзамического / Е. М. Рунова, Л. В. Аношкина // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7. – № 3 (27). – С. 136–142.
7. Тюкавина, О. Н. О методах интерпретации результатов акустической томографии древесины сосны // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2015. – № 4 (346). – С. 61–67.
8. Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины / А. Н. Чубинский, А. А. Тамби, А. А. Федяев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 2 (26). – С. 152–158.
9. Шарапов, Е. С. Сравнительный анализ способов определения плотности древесины с помощью рентгеновского излучения и устройства для измерения сопротивления сверлению / Е. С. Шарапов, В. Ю. Чернов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – Т. 18. – № 2. – С. 89–95.
10. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees / A. Arciniegas, F. Prieto, L. Brancheriau, P. Lasaygues // Trees. – 2014. – № 28 (6). – P. 1559–1567.
11. Clasmeier, O. Möglichkeiten und Grenzen der kombinierten Anwendung von Schalltomographie und elektrischer Widerstandstomographie am Beispiel von Rosskastanien / O. Clasmeier, S. Rust // Jahrbuch der Baumpflege – 2012.
12. Detection of decay in injured trees of silver fir using the method of tomography / T. Trestic, A. Haskovic, A. Čabaravdić [et al.] // Works of the Faculty of Forestry University of Sarajevo. – 2015. – № 1. – P. 1–11.
13. Rinn, F. Eineneue Bohrmethode zur Holzuntersuchung // Holz-Zentralblatt. – 1989. – № 15 (34). – P. 529–530.
14. Rinn, F. Holzanatomische Grundlagen der Schall-Tomographie an Bäumen // Neue Landschaft. – 2004. – № 7/04. – P. 44–47.
15. Wessenaer, P. A Review of Tree Risk Assessment Using Minimally Invasive Technologies and Two Case Studies / P. Wessenaer, M. Richardson // Arboricultural Journal. – 2009. – № 32 (4). – P. 275–292.

## References

1. Bulygin N. E., Yarmishko V. T. Dendrology. Moscow, 2002, 528 p. (in Russian).
2. Kryuchkov A.V., Abarinova N.G., Konovalova E.Yu. [et al.] State report on the state and environmental protection of the Irkutsk region in 2017. Irkutsk: Megaprint, 2018, 249 p. (in Russian).

3. Latuhina I.K., Babich N.A., Antonov A.M., Pastukhova N.O. (2016) Pulse-tomographic diagnosis of trunks in urban conditions on the example of small-leaved linden. *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], no. 7 (118), pp. 36-40 (in Russian).
4. Melnichuk I.A., Yassin M.J.S., Cherdantseva O.A. (2012) Diagnosis of the internal state of *Tilia cordata* Mill. trees using the complex of acoustic ultrasound tomography equipment ARBOTOM®. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Agronomija i zhivotnovodstvo* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Livestock], no 5, pp. 25-32 (in Russian).
5. Runova E.M., Gavrilin I.I., Gavrilina M.K. (2012) A comprehensive assessment of the ecological state of woody plants of the Bratsk urban ecosystem by the integrated indicator of sustainability. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal zone], V. 30, no. 3-4, pp. 312-315 (in Russian).
6. Runova E.M., Anoshkina L.V. (2017) Instrumental assessment of the state of urban planting of balsamic poplar. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 7, no. 3 (27), pp. 136-142 (in Russian).
7. Tyukavina O.N. (2015) On methods for interpreting the results of acoustic tomography of pine wood. *Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest magazine], no. 4 (346), pp. 61-67 (in Russian).
8. Chubinsky A. N., Tambi A. A., Fedyaev A. A. (et al.) (2015) Directions for the use of physical methods for controlling the structure and properties of wood. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 2 (26), pp. 152-158 (in Russian).
9. Sharapov E.S., Chernov V.Yu. (2014) Comparative analysis of methods for determining the density of wood using x-ray radiation and a device for measuring drilling resistance. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoj Vestnik], Vol. 18, no. 2, pp. 89-95 (in Russian).
10. Arciniegas A., Prieto F., Brancheriau L., Lasaygues P. (2014) Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees*, no. 28 (6), pp. 1559-1567.
11. Clasmeier O., Rust S. Möglichkeiten und Grenzen der kombinierten Anwendung von Schalltomographie und elektrischer Widerstandstomographie am Beispiel von Rosskastanien. *Jahrbuch der Baumpflege*. 2012.
12. Trestic T., Haskovic A., Čabaravdić A., Mujezinović O., Zahirović K. (2015) Detection of decay in injured trees of silver fir using the method of tomography. *Works of the Faculty of Forestry University of Sarajevo*, no. 1, pp. 1-11.
13. Rinn F. (1989) Eineneue Bohrmethode zur Holzuntersuchung. *Holz-Zentralblatt*, no. 15 (34), pp. 529-530.
14. Rinn F. (2004) Holzanatomische Grundlagen der Schall-Tomographie an Bäumen. *Neue Landschaft*, no. 7/04, pp. 44-47.
15. Wessenaer P., Richardson M.A. (2009) Review of Tree Risk Assessment Using Minimally Invasive Technologies and Two Case Studies. *Arboricultural Journal*, no. 32 (4), pp. 275-292.

### Сведения об авторах

Рунова Елена Михайловна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, Российская Федерация; e-mail: runova0710@mail.ru.

Гарус Иван Александрович – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, Российская Федерация; e-mail: ivan-garus@yandex.ru.

Мухачева Анастасия Николаевна – аспирант базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, Российская Федерация; e-mail: mukhacheva.an@gmail.com.

### Information about authors

*Runova Elena Mikhailovna* – DSc (Agriculture), Professor, Professor of the basic department of reproduction and processing of forest resources, FSBEI HE "Bratsk State University", Bratsk, Russian Federation; e-mail: runova0710@mail.ru.

*Garus Ivan Aleksandrovich* – PhD (Engineering), Associate Professor of the basic department of reproduction and processing of forest resources, FSBEI HE "Bratsk State University", Bratsk, Russian Federation; e-mail: ivan-garus@yandex.ru.

*Mukhacheva Anastasia Nikolaevna* – post-graduate student of the basic department of reproduction and processing of forest resources, FSBEI HE "Bratsk State University", Bratsk, Russian Federation; e-mail: mukhacheva.an@gmail.com