

УДК 630*81:632.4

РАННЯЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ГРИБНЫХ ИНФЕКЦИЙ В ДРЕВЕСИНЕ

С. Р. Лоскутов, Е. А. Тютюкова, М. А. Пляшечник, Е. А. Петрунина,
О. А. Шапченкова, А. А. Анискина

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036 Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: lsr@ksc.krasn.ru, katewood@inbox.ru, lilwood@ksc.krasn.ru, petrunina@ksc.krasn.ru,
sholga@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 03.08.2021 г.

Исследовалось изменение физико-химических показателей древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на ранней стадии развития в ней грибной инфекции с помощью методов ИК-Фурье спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Анализ СЭМ-изображений локально поврежденной древесины показал наличие гифов как в межклеточном пространстве, так и люменах единичных трахеид. Из сравнения результатов анализов поврежденной и здоровой древесины установлен ряд параметров ИК-спектров – изменение отношений интенсивности поглощения на характеристических частотах (волновых числах, см⁻¹) для полимеров древесинного вещества (гемцеллюлоз, целлюлозы, лигнина) и грибов (хитина и глюканов) $I_{1512/898}$, $I_{1512/1157}$, $I_{1512/894}$, $I_{1647/1551}$, $I_{1695/1533}$, $I_{1620/1564}$, позволяющий идентифицировать наличие и степень воздействия грибной инфекции на древесину. Представлен новый вариант оценки изменений в строении древесинного вещества, заключающийся в сравнительном анализе вторых производных ИК-спектров поглощения здоровой и поврежденной древесины. Способ существенно улучшает визуализацию изменений по спектрам и позволяет с большей точностью определять «адреса» воздействия грибной инфекции на древесинное вещество по интенсивности и частоте полос поглощения. Кроме того, может быть использован для мониторинга появления азотсодержащих соединений в результате присутствия грибов. Реализованные методические приемы указывают на возможность использования в работе радиальных кернов с целью проведения их сопряженного анализа, «привязывая» результаты ИК-Фурье спектроскопии к параметрам годовичных колец и в целом к хронологиям, а также соотнося их с морфолого-анатомическим строением годовичного кольца и отдельных трахеид по данным сканирующей электронной микроскопии. Предложенный подход к диагностике повреждения древесины на ранней стадии развития грибной инфекции признан эффективным, экспрессным и не требующим сложной пробоподготовки.

Ключевые слова: древесина сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ранняя стадия поражения грибами, ИК-Фурье спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

DOI: 10.15372/SJFS20210604

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ранней диагностики развития грибной и бактериальной инфекции в древесине лесных насаждений с помощью современных инструментальных аналитических методов актуальна как в экологическом аспекте (мониторинг состояния лесных экосистем), так и при определении направлений рационального лесопользования.

Важность ранней диагностики болезней деревьев, в частности грибных инфекций, в лесных экосистемах обусловлена необходимостью принятия своевременных решений по фитосанитарным и лесохозяйственным мероприятиям для недопущения широкой деградации лесных экосистем, а также для определения наиболее приемлемого использования пораженной древесины при ее заготовке.

Одним из основных требований рынка потребления древесины является ее качество, успешность контроля которого напрямую связана с экономической выгодой от реализации этого ценнейшего природного материала.

Анализ литературы показал, что для изучения биodeградации древесины под действием микроскопических грибов и бактерий используются методы термогравиметрии (ТГ/ДТГ) (Reh et al., 1986; Genestar, Pons, 2008; Popescu et al., 2010), ИК-Фурье спектроскопии (ИКФС) (Pandey, 1999; Popescu et al., 2007), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Popescu et al., 2011) и пиролитической хроматомасс-спектрометрии (Vane, 2003; Karami et al., 2013), причем, как правило, исследуется древесина на поздних стадиях развития инфекции.

В ряде работ по ИК-Фурье спектроскопии древесины, подверженной биодеструкции микроскопическими грибами, предложены методы анализа ИК-спектров, позволяющие определить «адреса» и степень воздействия грибов на древесинное вещество. Суть этих методов заключается в сравнении отношений интенсивности характеристических спектральных полос поглощения в ИК-диапазоне основными компонентами полимерного комплекса древесины (гемицеллюлозами, целлюлозой и лигнином) – здоровой и поврежденной (Karim et al., 2017; Sunardi et al., 2018; Gallio et al., 2018). Так, Е. Gallio с соавт. (2018) с помощью ИКФС оценено соотношение лигнин/углеводы в древесине эвкалипта (*Eucalyptus dunnii* Maidan) и сосны Эллиота (*Pinus elliottii* Engelm.) после 16-недельного испытания на разложение древесины возбудителем белой гнили трутовиком плоским (*Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat.). Авторами установлено, что гриб не отдавал предпочтения конкретному компоненту клеточной стенки: наблюдалось одновременное ухудшение качества целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина.

С.-М. Popescu с соавт. (2010) выявлены изменения в структуре древесинного вещества липы (*Tilia* L.) под действием триходермы зеленой (*Trichoderma viride* Pers.), установленные с помощью ИКФС после 84-дневного воздействия гриба. Оценены уменьшение интенсивностей характеристических полос для целлюлозы и гемицеллюлоз и увеличение интенсивностей полос, отнесенных к колебаниям связи С–О, из-за образования окисленных структур. Установлено, что при продолжительной деградации древесины образуются олигомеры, окисленные структуры и мелкие фрагменты (результат деструкции по-

лисахаридов), содержащие карбоксильные или карбонильные группы, что приводило к потере структурной целостности древесины липы.

Аналогичное исследование представлено в работе S. Sunardi с соавт. (2018) о биodeградации древесины ели аянской (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Cartière) под действием инокулированного гриба белой гнили сосновой губки (*Porodaedalea pini* (Brot.) Murrill) в течение 24 сут. Изменения в соотношении масс лигнин/углеводы оценивалось по изменению величин $I_{1512/1735}$, $I_{1512/1373}$, $I_{1512/894}$ (см. выше). Показано, что биodeградация древесины под действием сосновой губки не является селективной: ферментативной деструкции подвергаются одновременно целлюлоза (аморфная и кристаллическая часть) и лигнин.

Анализ литературы по теме нашей статьи свидетельствует об использовании метода ИКФС для определения структурных изменений в древесинном веществе после его обширной колонизации грибами- биodeдеструкторами. Не менее важной является проблема ранней диагностики заселения древесины грибами (например, при локальном появлении синевы) и поиска «физико-химических маркеров» начала грибной биодеструкции.

В связи с этим целью исследования было определение показателей (индикаторов) изменений в древесинном веществе на ранней стадии развития грибной инфекции по данным ИК-Фурье спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы древесины были заготовлены во время проведения санитарных рубок в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), приуроченных к Опытному хозяйству «Погорельский бор» ИЛ СО РАН (зона лесостепи Красноярского края, насаждения II–III классов возраста). Образцы (диски толщиной 2–3 см) были выпилены из нижней части ствола сразу после валки деревьев. Осмотр спилов выявил локальные небольшие зоны темно-серой окраски в заболонной части дисков, характерной для порока синевы древесины и свидетельствующие о начальной стадии ее колонизации грибами (рис. 1). На этом этапе исследований были сформированы две группы образцов – здоровой древесины (ЗД) и поврежденной (ПД) для СЭМ и ИКФС (рис. 1).

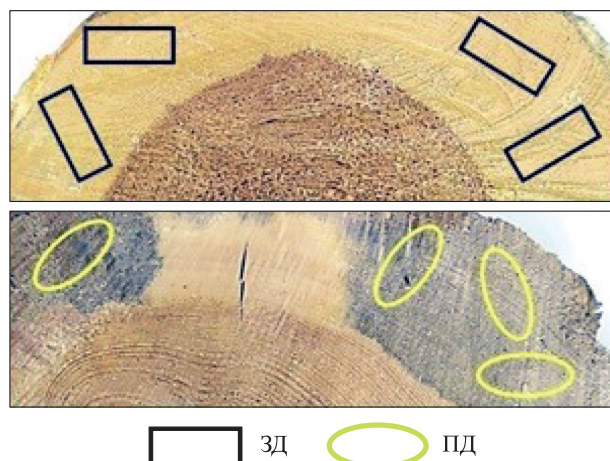


Рис. 1. Зоны взятия образцов для аналитических исследований.

После заготовки спилы подсушивали до воздушно-сухого состояния ($\sim 10\text{--}12\%$).

Для исследования структуры и степени повреждения древесины с помощью СЭМ использовали часть заболони (бруски размером $2 \times 2 \times 1$ см). Образцы выдерживали в течение часа в дистиллированной воде до необходимой твердости, которая позволяет получить качественные, не замазанные срезы на микротоме. Срезы толщиной $50\text{--}60$ мкм изготавливали на санном электронном микротоме MSE, помещали на двухсторонний проводящий углеродный скотч и высушивали в сушильном шкафу с вентиляцией при температуре 60°C в течение 1.5 ч. Затем переносили образец на «столик» электронного сканирующего микроскопа TM-1000 (Hitachi, Япония). Используемое увеличение – от $\times 50$ до $\times 4000$.

Для ИКФС были подготовлены образцы ЗД и ПД с помощью мелкозубчатой пилки (фракция опилок $0.1\text{--}0.3$ мм). ИК-Фурье спектроскопию проводили с помощью спектрометра Vertex 80 (Bruker, Германия) в диапазоне $4000\text{--}400$ cm^{-1} : спектральное разрешение показаний не более 2 cm^{-1} , пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений по шкале волновых чисел ± 0.5 cm^{-1} , при регистрации спектров поглощения время накопления 5 с, максимальная скорость сканирования 200 мм/с. Для снятия спектров использовали тонкие таблетки бромид калия с запрессованными в них образцами древесины (опилками): 1–2 мг древесины растирали в ступке с ~ 100 мг KBr, измельченный материал помещали в пресс-форму, эвакуировали воздух, прессовали при 75 $\text{kH} \times \text{cm}^{-2}$. Обработку спектров осуществляли с помощью пакета программ OPUS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На этапе исследований древесины с помощью сканирующей электронной микроскопии в межклеточном пространстве и в полостях трахеид ПД были обнаружены гифы грибов, которые проникли в трахеиды через поры. При этом деградации клеточной стенки не отмечено, что свидетельствует о начальной стадии колонизации древесины грибами (рис. 2). В задачи настоящего исследования не входила идентификация вида грибов.

На рис. 3 представлены ИК-спектры здоровой и поврежденной древесины в диапазоне «отпечатков пальцев» (а) и рассчитанные по ним вторые производные (б) (Popescu et al., 2010). Полосы 1506 , 1512 cm^{-1} являются характеристическими для лигнина (скелетные колебания ароматического кольца), а полосы 1157 и $894\text{--}898$ cm^{-1} – характеристические для углеводного комплекса (C–O–C – асимметричное растяжение связей в целлюлозе I, II и деформационные колебания C–H связи в глюкозном кольце гемицеллюлоз, целлюлозы и пектина соответственно) (Nelson et al., 1964; Rodrigues et al., 1998; Sunardi et al., 2018).

Полосы поглощения $1640\text{--}1660$ cm^{-1} отвечают растяжению связи C=O («Амид I»; (Bekiaris et al., 2020)); $1520\text{--}1560$ cm^{-1} – деформационным колебаниям связи N–H («Амид II») хитина и колебательным переходам в пептидном остове белков (Тарасевич, 2012; Kalnin et al., 1990; Venyaminov et al., 1990a, б; Šandula et al., 1999; Kumirska et al., 2010).

В диапазоне $2280\text{--}2380$ cm^{-1} спектра поврежденной древесины наблюдается сложная полоса поглощения небольшой интенсивности, являющаяся, по-видимому, результатом суперпозиции полос поглощения аминов и углекислого газа (рис. 3, а). Согласно данным Б. Н. Тарасевича (2012), широкая полоса в диапазонах $2700\text{--}2250$ cm^{-1} и $2500\text{--}2300$ cm^{-1} , иногда проявляющаяся в виде группы полос, характерна для солей аминов, которые в данном случае могут появляться в древесине в результате жизнедеятельности микроскопических грибов. Полоса $2400\text{--}2300$ – характеристическая для CO_2 (ГОСТ..., 1983), поэтому можно предположить, что пики поглощения в этом диапазоне спектра поврежденной древесины – это суперпозиция пиков поглощения, отражающих наличие солей аминов и углекислого газа, образовавшегося в результате дыхания грибов: при прохождении ИК-излучения через анализируемый образец

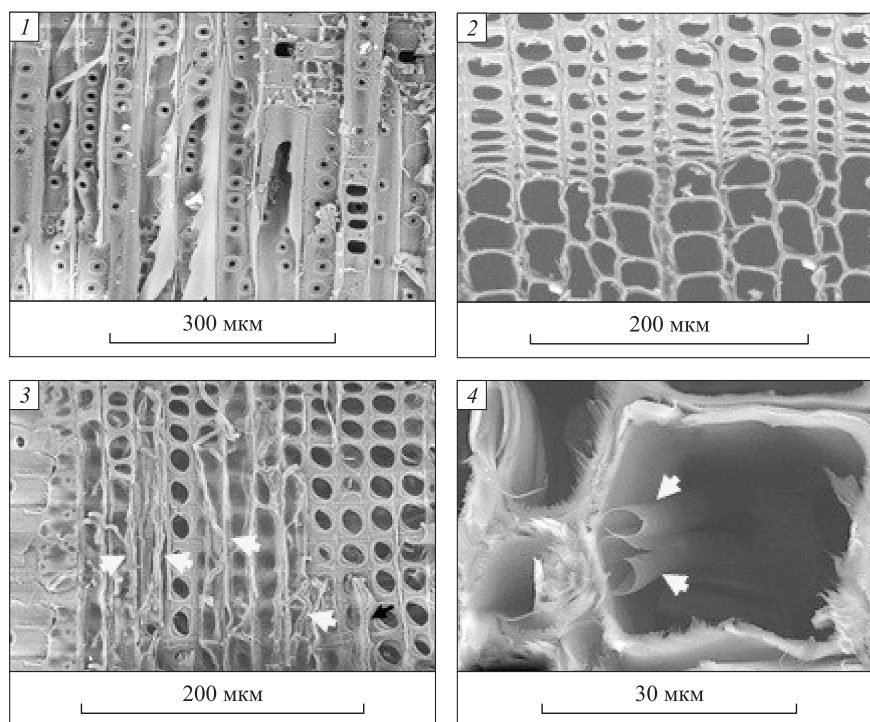


Рис. 2. СЭМ-изображения заболонной древесины сосны.

1, 2 – без признаков развития микроскопических грибов; 3, 4 – инфицированная грибами (стрелками указаны гифы грибов).

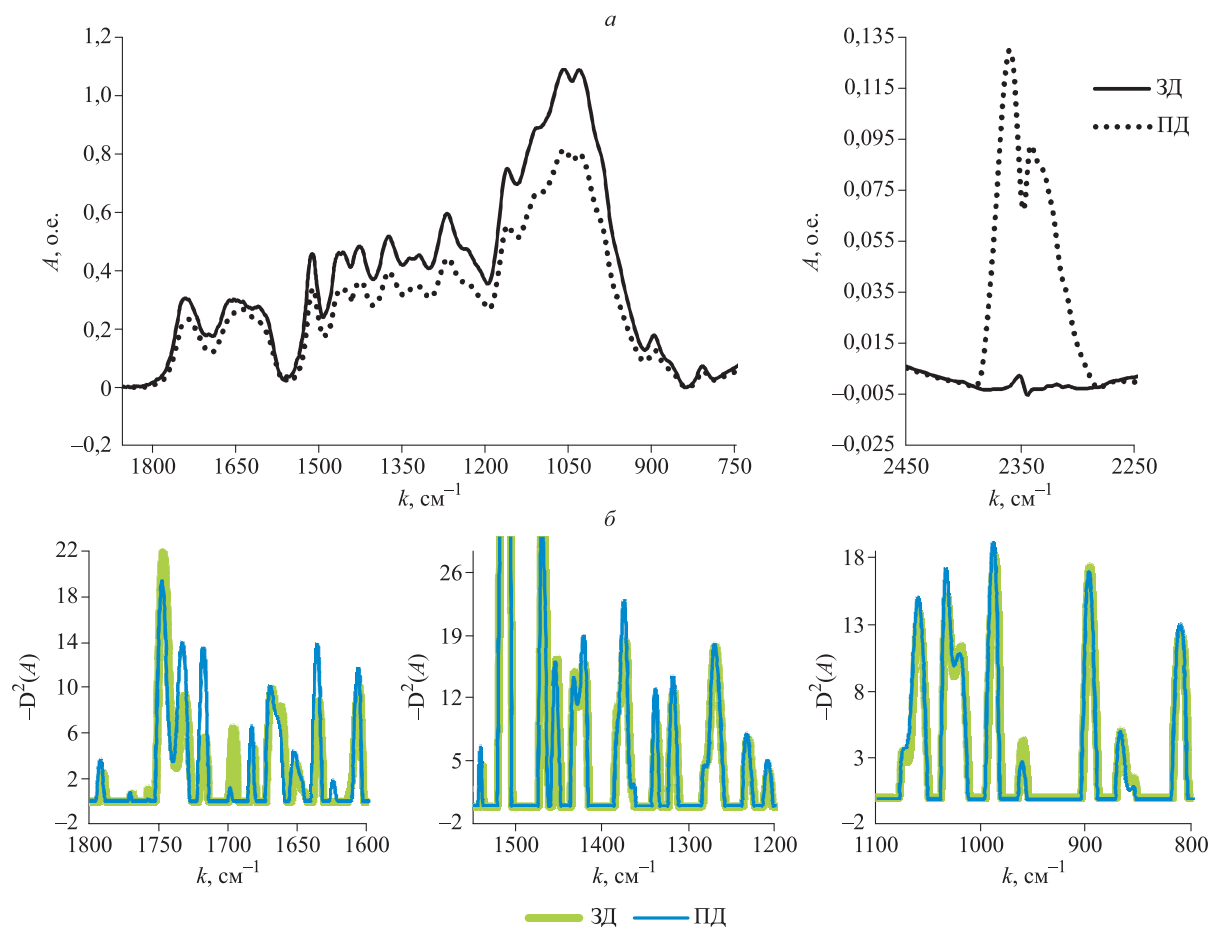


Рис. 3. ИК-спектры здоровой и поврежденной древесины (а) и вторые производные спектров (б).

A – поглощение; k – волновое число.

Относительное изменение интенсивности характеристических полос поглощения полимерных компонентов здоровой и поврежденной древесины

Компоненты	Отношение интенсивности поглощения	ЗД	ПД	Увеличение отношения интенсивностей поглощения относительно ЗД, %
Л/УК	$I_{1512/898}$	2.335	2.458	5.3
	$I_{1512/1157}$	0.555	0.563	1.4
	$I_{1512/894}$	2.589	2.659	2.8
«Амид» I, II	$I_{1647/1551}$	7.456	9.953	33.5
	$I_{1695/1533}$	1.426	1.630	14.3
	$I_{1620/1564}$	9.457	11.066	17.0

Примечание. Л/УК – относительное изменение интенсивности полос поглощения лигнина и углеводов.

происходит десорбция CO_2 , что наблюдается только в спектре поврежденной древесины (рис. 3, а).

Предлагаемый нами новый вариант использования второй производной ИК-спектра (рис. 3, б) – очень наглядный способ быстрого определения не только «адреса» воздействия грибной инфекции на древесинное вещество (по интенсивности и частоте полос поглощения), но также мониторинга появления азотсодержащих соединений (и/или уменьшения/увеличения их массы) в результате присутствия грибов.

По результатам измерений рассчитаны показатели, отражающие изменение в составе древесинного вещества под действием грибной инфекции на ранней стадии ее развития (см. таблицу).

Сравнение отношений интенсивности поглощения в спектре здоровой древесины с соответствующими величинами для поврежденной древесины указывает на возрастание массовой доли ароматических компонентов в поврежденной древесине (см. таблицу).

Анализ соотношения интенсивностей поглощения полос «Амид I» и «Амид II» свидетельствует о заметном росте содержания азотсодержащих веществ и структурных изменениях в них, что может быть обусловлено появлением грибной (и/или бактериальной) инфекции в древесине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный нами вариант использования ИК-Фурье спектроскопии в комплексе со сканирующей электронной микроскопией для индикации «адресности» воздействия грибной (возможно, и бактериальной) инфекции на древесинное вещество – эффективный инструмент для анализа изменения химического состава древесины на ранней стадии развития инфекции.

Для проведения аналитического исследования требуется небольшая масса образца. Это позволяет использовать в работе радиальные керны и проводить сопряженный их анализ, «привязывая» результаты ИКФС к параметрам годичных колец и в целом к хронологиям, а также соотнося их с морфолого-анатомическим строением годичного кольца и отдельных трахеид по данным сканирующей электронной микроскопии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса им. В. Н. Сукачевы СО РАН «Снижение рисков возрастающего воздействия болезней и вредителей на лесные экосистемы в условиях глобальных изменений окружающей среды», № 0287-2021-0011, Рег. НИОКТР № 121031500335-2, с использованием аналитических приборов и оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- ГОСТ 8.229-81, Группа Т88.4*. Государственная система обеспечения единства измерений. Спектрофотометры инфракрасные. Методы и средства поверки. М.: Изд-во стандартов, 1983. 22 с. [GOST 8.229-81, Group T88.4*. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Spektrofotometry infrakrasnye. Metody i sredstva poverki (GOST 8.229-81, Group T88.4*. State system for ensuring the uniformity of measurements. Infrared spectrophotometers. Methods and means of verification). Moscow: Izd-vo standartov (Publ. house of standards), 1983. 22 p. (in Russian)].
- Тарасевич Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: Изд-во МГУ, 2012. 55 с. [Tarasevich B. N. IR-spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedineniy. Spravochnye materialy (IR-spectra of the major classes of organic compounds. Reference materials). Moscow: Izd-vo MGU (Moscow St. Univ.), 2012. 55 p. (in Russian)].

- Bekiaris G., Tagkouli D., Koutrotsios G., Kalogeropoulos N., Zervakis D. I. Pleurotus mushrooms content in glucans and ergosterol assessed by ATR-FTIR spectroscopy and multivariate analysis // *Foods*. 2020. V. 9. Iss. 4. Article number: 535. P. 1–16.
- Gallio E., Zanatta P., Ribes D. D., Lazarotto M., Gatto D. A., Beltrame R. Fourier transform infrared spectroscopy in treated woods deteriorated by a white rot fungus // *Maderas. Cien. Tecnol.* 2018. V. 20. N. 3. P. 479–488.
- Genestar C., Pons C. Analytical characterization of biodegraded wood from a 15th century Spanish cloister // *Microchim. Acta*. 2008. V. 162. Iss. 3–4. Article number: 333. P. 333–339.
- Kalnin N. N., Baikalov I. A., Venyaminov S. Yu. Quantitative IR spectrophotometry of peptide compounds in water (H₂O) solutions. III. Estimation of the protein secondary structure // *Biopolymers*. 1990. V. 30. Iss. 13–14. P. 1273–1280.
- Karami L., Schmidt O., Fromm J., Klinberg A., Schmitt U. Wood decay characterization of a naturally-infected oak wood bridge using Py-GC/MS // *Wood Res.* 2013. V. 58. N. 4. P. 591–598.
- Karim M., Daryaei M. G., Torkaman J., Oladi R., Ghanbary M. A., Bari E., Yilgor N. Natural decomposition of horn-beam wood decayed by the white rot fungus *Trametes versicolor* // *Anais Acad. Bras. Cienc.* 2017. V. 89. N. 4. P. 2647–2655.
- Kumirska J., Czerwicka M., Kaczyński Z., Bychowska A., Brzozowski K., Thöming J., Stepnowski P. Application of spectroscopic methods for structural analysis of chitin and chitosan // *Mar. Drugs*. 2010. V. 8. N. 5. P. 1567–1636.
- Nelson M. L., O'Connor R. T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal latticed type. Part I. Spectra of lattice types I, II, III and of amorphous cellulose // *J. Appl. Polym. Sci.* 1964. V. 8. Iss. 3. P. 1311–1324.
- Pandey K. K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy // *J. Appl. Polym. Sci.* 1999. V. 71. Iss. 12. P. 1969–1975.
- Popescu C.-M., Popescu M.-C., Singurel G., Vasile C., Argyropoulos D. S., Willfor S. Spectral characterization of eucalyptus wood // *Appl. Spectrosc.* 2007. V. 61. Iss. 11. P. 1168–1177.
- Popescu C.-M., Popescu M.-C., Vasile C. Structural changes in biodegraded lime wood // *Carbohydrate Polym.* 2010. V. 79. Iss. 2. P. 362–372.
- Popescu C.-M., Tibirna C. M., Manoliu A., Gradinariu P., Vasile C. Microscopic study of lime wood decayed by *Chaetomium globosum* // *Cellulose Chem. Technol.* 2011. V. 45. Iss. 9–10. P. 565–569.
- Reh U., Kraepelin G., Lamprecht I. Use of differential scanning calorimetry for structural analysis of fungally degraded wood // *Appl. Environ. Microbiol.* 1986. V. 52. N. 5. P. 1101–1106.
- Rodrigues J., Faix O., Pereira H. Determination of lignin content of *Eucalyptus globulus* wood using FTIR spectroscopy // *Holzforschung*. 1998. V. 52. N. 1. P. 46–50.
- Šandula J., Kogan G., Kačuráková M., Machová E. Microbial (1-3)-b-D-glucans, their preparation, physico-chemical characterization and immunomodulatory activity // *Carbohydrate Polym.* 1999. V. 38. Iss. 3. P. 247–253.
- Sunardi S., Istikowati W. T., Ishiguri F., Yokota S. FTIR spectroscopy and color change of wood for assessment and monitoring of softwood degradation by white-rot fungus *Porodaedalea pini* // *AIP Conf. Proc.* 2018. V. 2026. Article number: 020024. P. 1–8.
- Vane C. H. The molecular composition of lignin in spruce decayed by white-rot fungi (*Phanerochaete chrysosporium* and *Trametes versicolor*) using pyrolysis-GC-MS and thermochemolysis with tetramethylammonium hydroxide // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2003. V. 51. Iss. 1. P. 67–75.
- Venyaminov S. Yu., Kalnin N. N. Quantitative IR spectrophotometry of peptide compounds in water (H₂O) solutions. I. Spectral parameters of amino acid residue absorption bands // *Biopolymers*. 1990a. V. 30. Iss. 13–14. P. 1243–1257.
- Venyaminov S. Yu., Kalnin N. N. Quantitative IR spectrophotometry of peptide compounds in water (H₂O) solutions. II. Amide absorption bands of polypeptides and fibrous proteins in a-, b-, and random coil conformations // *Biopolymers*. 1990b. V. 30. Iss. 13–14. P. 1259–1271.

EARLY INSTRUMENTAL DIAGNOSTICS OF FUNGAL INFECTIONS IN WOOD

S. R. Loskutov, E. A. Tyutkova, M. A. Plyashechnik, E. A. Petrunina,
O. A. Shapchenkova, A. A. Aniskina

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: lsr@ksc.krasn.ru, katewood@inbox.ru, lilwood@ksc.krasn.ru, petrunina@ksc.krasn.ru,
sholga@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru

The changes in the physico-chemical parameters of Scotch pine *Pinus sylvestris* L. wood were studied at an early stage of a fungal infection development in it using the methods of IR-Fourier spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM). Analysis of SEM-images of locally damaged wood showed the presence of hyphae both in the intercellular space and in the lumens of single tracheids. From the comparison of the results of analyses of damaged and healthy wood, a number of parameters of the IR spectra were established – a change in the ratio of the absorption intensity at characteristic frequencies (wave numbers, cm^{-1}) for polymers of wood substance (hemicellulose, cellulose, lignin) and fungi (chitin and glucans) $I_{1512/898}$, $I_{1512/1157}$, $I_{1512/894}$, $I_{1647/1551}$, $I_{1695/1533}$, $I_{1620/1564}$, which allows identifying the presence and degree of exposure to fungal infection on wood. A new version of the assessment of changes in the structure of the wood substance is presented, which consists in a comparative analysis of the second derivatives of the IR absorption spectra of sound and damaged wood. The method significantly improves not only the visualization of changes in the spectra, but also allows to more accurately determine the «addresses» of the impact of a fungal infection on the wood substance by the intensity and frequency of the absorption bands. In addition, it can be used to monitor the appearance of nitrogen-containing compounds because of the presence of fungi. The implemented methodological techniques indicate the possibility of using radial cores in the work for the purpose of conducting their conjugate analysis, «linking» the results of IR-Fourier spectroscopy to the parameters of the annual rings and, in general, to chronologies, as well as correlating them with the morphological and anatomical structure of the annual ring and individual tracheids according to scanning electron microscopy data. The proposed approach to the diagnosis of wood damage at an early stage of the development of a fungal infection is effective, rapid and does not require complex sample preparation.

Keywords: Scotch pine *Pinus sylvestris* L. wood, early stage of fungal infestation, FTIR spectroscopy, scanning electron microscopy.

How to cite: Loskutov S. R., Tyutkova E. A., Plyashechnik M. A., Petrunina E. A., Shapchenkova O. A., Aniskina A. A. Early instrumental diagnostics of fungal infections in wood // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. F. Sci.). 2021. N. 6. P. 39–45 (in Russian with English abstract and references).