

Научная статья

УДК 543.42+035.2

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-1-5-16>

Количественное определение лигнина в растительных материалах с помощью ИК-спектроскопии

Сергей Геннадьевич Кострюков, Никита Андреевич Малов, Хусаин Бахрамович Матякубов, Иван Александрович Конушкин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

Аннотация. Разработан методический подход для определения содержания лигнина в растительных материалах методом ИК-Фурье в среднем инфракрасном диапазоне. Методика определения содержания лигнина основана на использовании калибровочного графика, отражающего зависимость интенсивности аналитической полосы поглощения 1510 см^{-1} от содержания лигнина в модельных образцах. Данная методика апробирована на широком круге образцов лигноцеллюлозной биомассы. Показана пригодность предлагаемого метода для определения содержания лигнина.

Ключевые слова: ИК-спектроскопия; полоса поглощения; лигноцеллюлозная биомасса; лигнин; целлюлоза; гемицеллюлоза.

Для цитирования: Кострюков С.Г., Малов Н.А., Матякубов Х.Б., Конушкин И.А. Количественное определение лигнина в растительных материалах с помощью ИК спектроскопии // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, № 1. С. 5–16. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-1-5-16>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-1-5-16>

Quantitative determination of lignin in plant materials by IR spectroscopy

Sergey G. Kostryukov, Nikita A. Malov, Khusain B. Matyakubov, Ivan A. Konushkin

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Abstract. A methodical approach for determining the content of lignin in plant materials by the FT-IR method in the mid-infrared range has been developed. The technique for determining lignin content is based on the use of a calibration graph reflecting the dependence of the intensity of the 1510 cm^{-1} analytical absorption band on the lignin content in model samples. This method was tested on a wide range of lignocellulosic biomass samples. The suitability of the proposed method for the determination of lignin content has been shown.

Key words: IR spectroscopy, absorption band, lignocellulosic biomass, lignin, cellulose, hemicellulose

For citation: Kostryukov, S.G., Malov, N.A., Matyakubov, Kh.B. and Konushkin, I.A. (2022) “Quantitative determination of lignin in plant materials using IR spectroscopy”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 12, no. 1, pp. 5–16. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-1-5-16>



ИК-Фурье спектроскопия в среднем спектральном диапазоне – полезный аналитический метод исследования древесины, отличающийся простотой подготовки образцов, экспрессностью регистрации спектра и требующий для получения результатов очень небольших количеств материала [1–4]. В настоящее время ИК-спектроскопию используют для исследования структуры и природы лигноцеллюлозных материалов, определения их качественного и количественного состава, получения информации о количестве функциональных групп и других специфических структурных особенностях [5–8]. Лигноцеллюлозная биомасса представляет собой важный возобновляемый углеродсодержащий ресурс, который может быть использован для получения биотоплива и ценных химических веществ [9, 10]. Как известно, основными компонентами большинства растительных материалов являются целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин [11]. Данные компоненты, выделенные в индивидуальном виде, широко применяются в промышленности. Например, высокая практическая ценность целлюлозы и ее производных, в частности простых и сложных эфиров, определяет необходимость исследования альтернативных источников сырья для ее получения [12]. Основное применение гемицеллюлоз состоит в получении из них биополимеров, которые могут использоваться в их естественных или модифицированных формах в различных областях, включая продукты питания и непищевые приложения [13, 14]. Кроме того, в результате химической переработки из гемицеллюлозы получают фурфурол, 5-гидрокси-метилфурфурол, левулиновую кислоту и другие ценные соединения [15]. Лигнин широко используется в качестве топлива в бумажной

промышленности и на биоперерабатывающих заводах. Кроме того, он применяется как добавка в пластмассы для увеличения биодegradуемости, энтеросорбент в медицине, полимерная матрица для контролируемого высвобождения пестицидов [16]. Лигнин можно использовать в качестве недорогого сырья для производства химических веществ и добавки к материалам для механического армирования, улучшения антиоксидантной и антимикробной активности, защиты от ультрафиолета, а также в биомедицинских целях [17, 18].

Наличие химических связей между углеводными фракциями и лигнином является основным барьером для деградации лигноцеллюлозной структуры при ее превращении в топливо [19] или химическое сырье [9, 20]. Знание исходного содержания лигнина и углеводов в растительных материалах имеет первостепенное значение как для выбора способа переработки, так и для определения, какой именно продукт выгоднее получать из того или иного сырья [20, 21]. Большинство аналитических методов определения содержания лигнина и углеводов деструктивны, трудоемки, требуют значительного количества материала, генерируют большое количество химических отходов и не всегда дают достоверные результаты [17]. Следовательно, крайне желательно разработать простые и быстрые спектроскопические методы определения содержания этих компонентов, среди которых ИК-спектроскопия представляет собой наиболее доступный и привлекательный метод [22].

Следует сказать, что использование ИК-спектроскопии для анализа древесины и ее основных компонентов началось еще во второй половине XX века [23] и по настоящее время

активно используется. Так, в работе [24] проведено отнесение полос поглощения для компонентов древесины хвойных и лиственных пород. Описано применение ИК-Фурье спектроскопии для сравнения целлюлозных волокон различных растений [25]. Экспрессность ИК-спектроскопии позволят использовать для анализа широкий набор образцов, результаты, исследования которых удобно обрабатывать математическими методами [26].

Цель настоящей работы состояла в разработке и апробации метода определения лигнина с помощью ИК-Фурье спектроскопии с использованием стандартного метода взвесей в таблетках КВт. В качестве объектов исследования были использованы различные образцы древесины и сельскохозяйственные отходы: в общей сложности – 16 образцов. Содержание лигнина, полученное методом ИК-спектроскопии, сравнивали с данными работы, в которой содержание лигнина было вычислено на основе CP/MAS ЯМР ^{13}C спектров [27].

Экспериментальная часть

Методология анализа включала этап построения калибровочного графика, отражающего зависимость аналитической полосы поглощения от содержания лигнина в модельных образцах. В качестве стандартов были использованы микрокристаллическая целлюлоза (Sigma-Aldrich, 435236) и крафт-лигнин (Sigma-Aldrich, 471003). В качестве объектов исследования были использованы несколько образцов древесины и различные сельскохозяйственные отходы.

Сбор образцов осуществляли с живых деревьев, произрастающих в лесопарковой зоне г. Саранска. Предпочтение отдавалось деревьям возраста 60–80 лет. Для взятия образцов древесины использовались возрастные буры Haglof

($d = 5,15$ мм, $l = 100$ мм), при помощи которых высверливались радиальные керны. Образцы древесины высверливали перпендикулярно продольной оси ствола на высоте примерно 1 м от поверхности земли. Ячменная солома, тыквенная скорлупа, подсолнечная лузга были предоставлены местными сельскохозяйственными производителями. Скорлупа грецкого ореха, арахиса, фисташки, миндаля взята с орехов, приобретенных на рынке. Пивная дробина предоставлена саранским филиалом пивоваренной компании АВ InBevEfes. Предварительное измельчение материалов до фракции 0,5 мм проводили на роторно-ножевой мельнице РМ-120 (фирма «Вибротехник») и модернизированном измельчителе ИЗ-14М (ООО «Уралспецмаш»).

ИК-спектры образцов в виде таблеток КВт снимали на Фурье-спектрометре «ИнфРАЛЮМ ФТ-08» в диапазоне от 400–4000 см^{-1} , с разрешением 4 см^{-1} , использованием аподизации Бесселева, временем накопления 60 с, количеством сканов 93 при температуре окружающей среды $+20^\circ\text{C}$, нормальном атмосферном давлении, влажности воздуха 55%. Инфракрасные спектры обрабатывались при помощи программного обеспечения СпектраЛЮМ, версия 2.0.1.295.

Результаты и их обсуждение

Метод пропускания с использованием суспензии образца в таблетки КВт был выбран для анализа растительных материалов неслучайно. Например, более удобный метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), основанный на принципе поверхностного отражения, больше подходит для анализа образцов, в которых все компоненты однородно распределены в матрице. Напротив, растительная биомасса имеет сложную трехмерную структуру, и

поэтому метод таблеток KBr дает более репрезентативную информацию об ее общей структуре. Кроме того, использование таблеток KBr позволяет взять одинаковое количество каждого образца и KBr, при этом таблетки KBr будут иметь одинаковую толщину, а получаемые таким способом данные будут более сопоставимы между собой, чем результаты, полученные с помощью метода НПВО. Для ИК-исследований были взяты точные навески 10 мг образца лигноцеллюлозной биомассы и 1000 мг KBr, полученную смесь дополнительно измельчали и перемешивали с помощью полуавтоматической вибрационной мельницы Herzog HP-M 100 в размольном контейнере из карбида вольфрама

в течение 30 с. Тщательное измельчение необходимо, так как при обычном истирании в ступке размер растертых частиц для данных образцов больше длины волны ИК-излучения. После чего из порошков прессовали таблетки массой 200 мг, для которых снимали ИК-спектры. Прессование осуществлялось на прессе «LabTools» при давлении до 20 МПа. Для сравнения ниже приведены ИК-спектры для древесины лиственницы, полученные для таблеток образцов с KBr, приготовленных по модифицированной и стандартной методике (рис. 1). Отчетливо видно, что стандартная пробоподготовка дает спектры с более низкой интенсивностью и худшего разрешения.

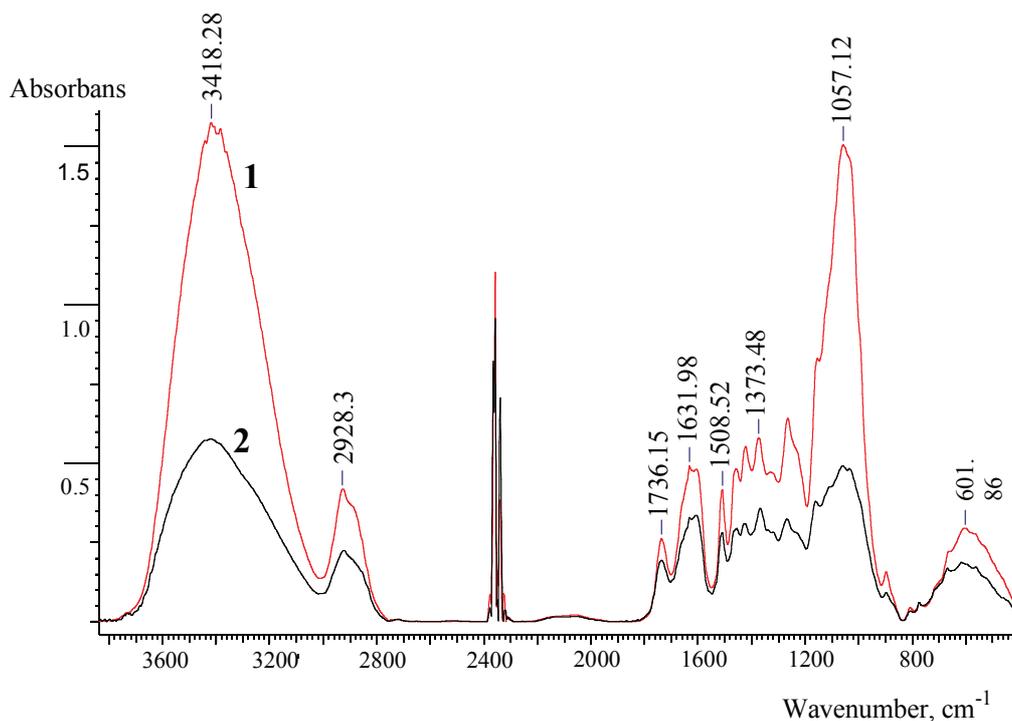


Рис. 1. ИК-спектры целлюлозы древесины лиственницы: 1 – ИК-спектр с использованием механического измельчения; 2 – ИК-спектр с использованием стандартной пробоподготовки

В качестве аналитической полосы для определения содержания лигнина была использована полоса поглощения в диапазоне 1512–1508 cm^{-1} , относящаяся к скелетным колебаниям связей C=C ароматических колец гваяциль-

ного и сирингильного фрагментов (интенсивность определялась по максимуму). Преимущество использования данной полосы поглощения состоит в том, в ИК-спектре целлюлозы в этой области спектра нет полос поглощения.

Для построения калибровочного графика были приготовлены искусственные смеси, имитирующие растительный материал, состоящие из микрокристаллической целлюлозы и крафт-лигнина. Состав смесей приведен в табл. 1. Общая масса смеси составляла 10 мг, а масса КВг – 1000 мг, подготовка образца осуществлялась точно также, как и для природных материалов. В табл. 1 приведены также интенсивности аналитических полос поглощения. Приведенное значение интенсивности является средним арифметическим из трех независимых оп-

ределений. При определении интенсивности полос поглощения в спектрах проводили коррекцию базовой линии по точкам 1834 см⁻¹ и 836 см⁻¹. Как видно из табл. 1, при увеличении доли лигнина в смеси интенсивность полосы поглощения 1508–1512 см⁻¹, как и следовало ожидать, увеличивается.

На основании полученных данных построен график, отражающий зависимость интенсивности полосы поглощения 1508–1512 см⁻¹ от содержания лигнина в модельных образцах (рис. 2).

Таблица 1

Состав калибровочных смесей и интенсивности аналитических полос поглощения

№ образца	Лигнин, %	Целлюлоза, %	$I_{1508-1512}$
1	0	100	0.1402±0.009
2	10	90	0.2197±0.009
3	20	80	0.2636±0.009
4	30	70	0.3194±0.010
5	40	60	0.4151±0.013
6	50	50	0.4596±0.011
7	60	40	0.5307±0.012
8	70	30	0.6017±0.013
9	80	20	0.6594±0.014
10	90	10	0.7715±0.015
11	100	0	0.8526±0.015

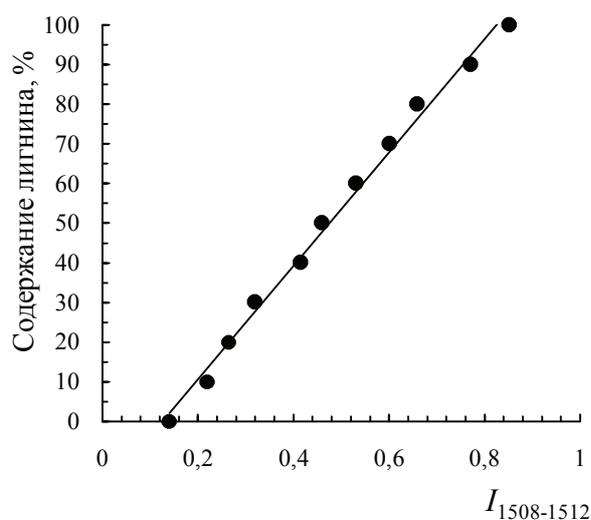


Рис. 2. График зависимости интенсивности полосы поглощения 1508–1512 см⁻¹ от содержания лигнина в смеси с целлюлозой

На основании графика получена градуировочная функция, на основании которой выведена формула, позволяющая по интенсивности аналитической полосы определить содержание лигнина:

$$C_{\text{лигнина}} = 143,11I_{1508-1512} - 18,087 \quad (R^2 = 0,9935)$$

ИК-спектры растительных материалов для каждого образца лигноцеллюлозной биомассы были записаны для трех таблеток КВг. В табл. 2 приведен перечень растительных материалов, значение интенсивности аналитических полос поглощения и вычисленные на основании формулы содержание лигнина.

**Перечень образцов растительной биомассы, интенсивности полос поглощения
и вычисленное содержание лигнина**

Образец	$I_{1508-1512}$	Содержание лигнина, %	
		ИК	CPMAS ЯМР ^{13}C [27]
Древесина ели (1)	0.3227±0.0065	28.1±0.92	29.5
Древесина сосны (2)	0.2655±0.0062	19.9±0.90	20.1
Древесина лиственницы (3)	0.3078±0.0061	27.4±0.88	29.2
Древесина осины (4)	0.2601±0.0065	19.1±0.94	20.6
Древесина тополя (5)	0.2497±0.0059	17.6±0.84	16.2
Древесина березы (6)	0.2514±0.0062	17.9±0.90	16.2
Древесина дуба (7)	0.3337±0.0056	29.7±0.79	24.2
Древесина липы (8)	0.2912±0.0054	23.6±0.75	22.8
Ячменная солома сорта Маргрет (9)	0.2012±0.0058	10.7±0.80	7.4
Пивная дробина (10)	0.1907±0.0068	9.2±0.97	5.4
Скорлупа семян подсолнечника сорта Родник (11)	0.2268±0.0062	14.4±0.93	13.1
Скорлупа семян тыквы сорта Витаминная (12)	0.4182±0.0059	41.8±0.89	46.3
Скорлупа грецкого ореха сорта Чандлер (13)	0.3228±0.0058	28.1±0.84	28.0
Скорлупа арахиса сорта Вирджиния (14)	0.4236±0.0059	41.1±0.85	40.2
Скорлупа фисташки сорта Узун (15)	0.3307±0.0058	29.2±0.87	28.0
Скорлупа миндаля сорта Монтерей (16)	0.3098±0.0053	26.2±0.0082	27.5

Ниже в качестве примера представлены ИК спектры некоторых лигноцеллюлозных материалов (рис. 3). При сравнении литературных

данных и результатов, полученных на основании ИК-спектров (табл. 3), видно хорошее согласие данных практически для всех образцов.

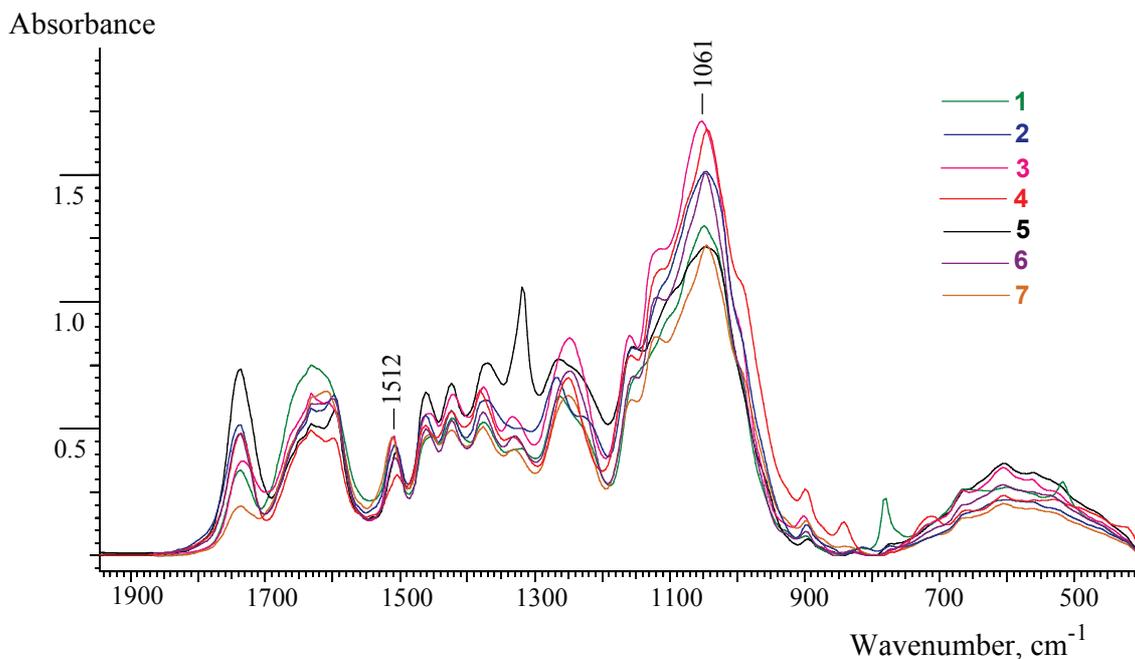


Рис. 3. ИК-спектры некоторых лигноцеллюлозных материалов: 1 – древесина ели (1), 2 – древесина лиственницы (3), 3 – ячменная солома (9), 4 – скорлупа семян подсолнечника (11), 5 – скорлупа грецкого ореха (13), 6 – скорлупа арахиса (14), 7 – скорлупа миндаля (16).

Таким образом, разработанный нами метод определения лигнина с использованием ИК-спектроскопии пригоден для широкого спектра растительных материалов. Наиболее важным для достижения воспроизводимости результатов является метод пробоподготовки, включающий тщательное измельчение материала, а также использование точных навесок образца и КВг, что позволяет получать сопоставимые результаты. Использование ИК-спектроскопии, по сравнению со стандартным методом определения лигнина, основанным на кислотном гид-

ролизе углеводов, является более перспективным, так как не требует химических реактивов и отличается простой и точностью анализа.

Выводы

Предлагаемый нами метод количественного определения содержания лигнина в растительных материалах с помощью ИК-Фурье спектроскопии является достаточно надежным, что подтверждено апробацией на широком круге образцов лигноцеллюлозной биомассы и может быть использовано для широкого набора различных растительных материалов.

Список источников

1. Moore A.K., Owen N.L. Infrared spectroscopic studies of solid wood // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2001. Vol. 36, № 1. P. 65–86. <http://doi.org/10.1081/ASR-100103090>.
2. Pozhidaev V.M., Sergeeva Y.E., Malakhov S.N., Yatsishina E.B. Identification of Archaeological Wood Species by IR Spectroscopy // *Journal of Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 76, № 5. P. 573–577. <http://doi.org/10.1134/S1061934821050142>.
3. Zhao P., Li Z.-Y., Wang C.-K. Wood Species Recognition Based on Visible and Near-Infrared Spectral Analysis Using Fuzzy Reasoning and Decision-Level Fusion // *Journal of Spectroscopy*. 2021. P. 6088435. <http://doi.org/10.1155/2021/6088435>.
4. Traoré M., Kaal J., MartínezCortizas A. Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR // *Wood Science and Technology*. 2018. Vol. 52, № 2. P. 487–504. <http://doi.org/10.1007/s00226-017-0967-9>.
5. Ozgenc O., Durmaz S., HakkiBoyaci I., Eksi-Kocak H. ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi // *Drewno*. 2018. Vol. 61, № 201. P. 91–105. <http://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.247.02>.
6. Derkacheva O., Sukhov D. Investigation of lignins by FTIR spectroscopy // *Macromolecular Symposia*. 2008. Vol. 265, № 1. P. 61–68. <http://doi.org/10.1002/masy.200850507>.
7. Traoré M., Kaal J., MartínezCortizas A. Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood // *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2016. № 153. P. 63–70. <http://doi.org/10.1016/j.saa.2015.07.108>.
8. Fougere D., Nanda S., Clarke K., Kozinski J.A., Li K. Effect of acidic pretreatment on the chemistry and distribution of lignin in aspen wood and wheat straw substrates // *Biomass and Bioenergy*. 2016. № 91. P. 56–68. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.027>.
9. Long H., Li X., Wang H., Jia J. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. № 26. P. 344–352. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>.

10. Nanda S., Mohammad J., Reddy S.N., Kozinski J.A., Dalai A.K. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2013. Vol. 4, № 2. P. 157–191. <http://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>.
11. Volynets B., Ein-Mozaffari F., Dahman Y. Biomass processing into ethanol: Pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing // *Green Processing and Synthesis*. 2017. Vol. 6, № 1. P. 1–22. <http://doi.org/10.1515/gps-2016-0017>.
12. Vallejo M., Cordeiro R., Dias P.A.N., et al. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, straw-berry-tree fruit and fava // *Bioresources and Bioprocessing*. 2021. Vol. 8, № 1. P. 25. <http://doi.org/10.1186/s40643-021-00377-3>.
13. Spiridon I., Popa V.I. Hemicelluloses: Major sources, properties and applications // *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources* / M.N. Belgacem, A. Gandini, editors. Elsevier Science, 2008. P. 289–304. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00013-2>.
14. Qaseem M.F., Shaheen H., Wu A.-M. Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144, № 7. P. 110996. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110996>.
15. Kabbour M., Luque R. Furfural as a platform chemical: From production to applications // *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Recent Advances in Development of Platform Chemicals*. Elsevier, 2019. P. 283–297. <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-64307-0.00010-X>.
16. Zobiolo L.H.S., dos Santos W.D., Bonini E., et al. Lignin: from nature to industry // *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy* / R.J. Paterson editor. Nova Science, 2012. P. 419–435.
17. Tian X., Fang Z., Smith R.L., Wu Z., Liu M. Properties, chemical characteristics and application of lignin and its derivatives // *Production of Biofuels and Chemicals from Lignin* / Z. Fang, R.L. Smith, editors. Springer. 2016. P. 3–34. http://doi.org/10.1007/978-981-10-1965-4_1.
18. Kai D., Tan M. J., Chee P.L., et al. Towards lignin-based functional materials in a sustainable world // *Green Chemistry*. 2016. Vol. 18, № 5. P. 1175–1200. <http://doi.org/10.1039/c5gc02616d>.
19. Nanda S., Mohammad J., Reddy S.N., Kozinski J.A., Dalai A.K. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2013. Vol. 4, № 2. P. 157–191. <http://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>.
20. Garlapati V.K., Chandel A.K., et al. Circular economy aspects of lignin: Towards a lignocellulose biorefinery // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 130. P. 109977. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109977>.
21. Ragauskas A.J., Williams C.K., et al. The path forward for biofuels and biomaterials // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 484–489. <http://doi.org/10.1126/science.1114736>.
22. Castillo R.P., Peña-Farfal C., Neira Y., Freer J. Advances in analytical methodologies based on infrared spectroscopy for analysis of lignocellulosic materials: From classic characterization of functional groups to FT-IR imaging and micro-quantification // *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): Methods, Analysis and Research Insights*. 2016. P. 33–66.

23. Karklin' V.B. IR spectroscopy of wood and its main components. XVIII. IR spectra of preparations of lignosulfonic acids from the wood of coniferous and broad-leaved species // Chemistry of Natural Compounds. 1981. Vol. 17, № 6. P. 566–570. <http://doi.org/10.1007/BF00574378>.

24. Pandey K.K. A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy // Journal of Applied Polymer Science. 1999. Vol. 71, № 12. P. 1969–1975.

25. Vârban R., Crişan I., et al. Comparative FT-IR prospecting for cellulose in stems of some fiber plants: Flax, velvet leaf, hemp and jute // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 18. P. 8570. <http://doi.org/10.3390/app11188570>.

26. Rammal A., Perrin E., Vrabie V., Bertrand I., Chabbert B. Classification of lignocellulosic biomass by weighted-covariance factor fuzzy C-means clustering of mid-infrared and near-infrared spectra // Journal of Chemometrics. 2017. Vol. 31, № 2. P. 2865. <http://doi.org/10.1002/cem.2865>.

27. Kostryukov S.G., Petrov P.S., et al. Determination of Lignin Content in Plant Materials Using Solid-State ¹³C NMR Spectroscopy // Polymer Science – Series B. 2021. Vol. 63, № 5. P. 544–552. <http://doi.org/10.1134/S1560090421050067>.

Информация об авторах

Кострюков Сергей Геннадьевич, кандидат химических наук, доцент кафедры органической химии, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68), kostryukov_sg@mail.ru

Малов Никита Андреевич, студент 3-го курса специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68), nik.malov.2020@bk.ru

Матякубов Хусаин Бахрамович, аспирант 1-го года обучения направления подготовки 04.06.01 «Химические науки», Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68), husin_518@mail.ru

Коңушкин Иван Александрович, студент 3-го курса специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия» Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68), konushkinivan71@gmail.com

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 1 декабря 2021 г.; одобрена 22 декабря 2021 г.; принята к публикации 20 января 2022 г.

References

1. Moore, A.K. and Owen, N.L. (2001) “Infrared spectroscopic studies of solid wood”, *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 65–86.
2. Pozhidaev, V.M., Sergeeva, Y.E., Malakhov, S.N. and Yatsishina, E.B. (2021) “Identification of Archaeological Wood Species by IR Spectroscopy”, *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 76, no. 5, pp. 573–577.

3. Zhao, P., Li, Z.-Y. and Wang, C.-K. (2021) “Wood Species Recognition Based on Visible and Near-Infrared Spectral Analysis Using Fuzzy Reasoning and Decision-Level Fusion”, *Journal of Spectroscopy*, pp. 6088435.
4. Traoré, M., Kaal, J. and Martínez Cortizas, A. (2018) “Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR”, *Wood Science and Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 487–504.
5. Ozgenc, O., Durmaz, S., Hakki Boyaci, I. and Eksi-Kocak, H. (2018) “ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi”, *Drewno*, vol. 61, no. 201, pp. 91–105.
6. Derkacheva, O. and Sukhov, D. (2008) “Investigation of lignins by FTIR spectroscopy”, *Macromolecular Symposia*, vol. 265, no. 1, pp. 61–68.
7. Traoré, M., Kaal, J. and Martínez Cortizas, A. (2016) “Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood”, *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, no. 153, pp. 63–70.
8. Fougere, D., Nanda, S., Clarke, K., Kozinski, J.A. and Li, K. (2016) “Effect of acidic pretreatment on the chemistry and distribution of lignin in aspen wood and wheat straw substrates”, *Biomass and Bioenergy*, no. 91, pp. 56–68.
9. Long, H., Li, X., Wang, H. and Jia, J. (2013) “Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 26, pp. 344–352.
10. Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S.N., Kozinski, J.A. and Dalai, A.K. (2013) “Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 4, no. 2, pp. 157–191.
11. Volynets, B., Ein-Mozaffari, F. and Dahman, Y. (2017) “Biomass processing into ethanol: Pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing”, *Green Processing and Synthesis*, vol. 6, no. 1, pp. 1–22.
12. Vallejo, M., Cordeiro, R., Dias, P.A.N., Moura, C., Henriques, M., Seabra, I.J., Malça, C.M. and Mourouço, P. (2021) “Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, straw-berry-tree fruit and fava”, *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 8, no. 1, pp. 25.
13. Spiridon, I. and Popa, V.I. (2008) Hemicelluloses: Major sources, properties and applications. In: Belgacem, M.N., and Gandini, A. (eds.) *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, Elsevier Science, pp. 289–304.
14. Qaseem, M.F., Shaheen, H. and Wu, A.-M. (2021) “Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, no. 7, pp. 110996.
15. Kabbour, M. and Luque, R. (2019) Furfural as a platform chemical: From production to applications. In: *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Recent Advances in Development of Platform Chemicals*, Elsevier, pp. 283–297.
16. Zobiolo, L.H.S., dos Santos, W.D., Bonini, E., Ferrarese-Filho, O., Kremer, R.J. and Oliveira-Junior, R. (2012) Lignin: from nature to industry. In: Paterson, R.J. (ed.) *Lignin: Properties and Applications in Biotechnology and Bioenergy*, Nova Science, pp. 419–435.

17. Tian, X., Fang, Z., Smith, R.L., Wu, Z. and Liu, M. (2016) Properties, chemical characteristics and application of lignin and its derivatives. In: Fang, Z. and Smith, R.L. (eds.) *Production of Biofuels and Chemicals from Lignin*, Springer, pp. 3–34.
18. Kai, D., Tan, M.J., Chee, P.L., Chua, Y.K., Yap, Y.L. and Loh X.J. (2016) “Towards lignin-based functional materials in a sustainable world”, *Green Chemistry*, vol. 18, no. 5. pp. 1175–1200.
19. Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S.N., Kozinski, J.A. and Dalai, A.K. (2013) “Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 4, no. 2, pp. 157–191.
20. Garlapati, V.K., Chandel, A.K., Kumar, S.J., Sharma, S., Sevda, S., Ingle, A.P., and Pant, D. (2020) “Circular economy aspects of lignin: Towards a lignocellulose biorefinery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 130, pp. 109977.
21. Ragauskas, A.J., Williams, C.K., Davison, B.H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C.A., and Tschaplinski, T. (2006) “The path forward for biofuels and biomaterials”, *Science*, vol. 311, pp. 484–489.
22. Castillo, R.P., Peña-Farfal, C., Neira, Y. and Freer, J. (2016) Advances in analytical methodologies based on infrared spectroscopy for analysis of lignocellulosic materials: From classic characterization of functional groups to FT-IR imaging and micro-quantification. In: *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): Methods, Analysis and Research Insights*, pp. 33–66.
23. Karklin', V.B. (1981) “IR spectroscopy of wood and its main components. XVIII. IR spectra of preparations of lignosulfonic acids from the wood of coniferous and broad-leaved species”, *Chemistry of Natural Compounds*, vol. 17, no. 6. pp. 566–570.
24. Pandey, K.K. (1999) “A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 71, no. 12, pp. 1969–1975.
25. Vârban, R., Crişan, I., Vârban, D., Ona, A., Olar, L., Stoie, A., and Ştefan, R. (2021) “Comparative FT-IR prospecting for cellulose in stems of some fiber plants: Flax, velvet leaf, hemp and jute”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, pp. 8570.
26. Rammal, A., Perrin, E., Vrabie, V., Bertrand, I. and Chabbert, B. (2017) “Classification of lignocellulosic biomass by weighted-covariance factor fuzzy C-means clustering of mid-infrared and near-infrared spectra”, *Journal of Chemometrics*, vol. 31, no. 2, pp. e2865.
27. Kostryukov, S.G., Petrov, P.S., Kalyazin, V.A., Masterova, Y., Tezikova, V.S., Khluchina, N.A., Labzina, L. Ya. and Alalvan, D.K. (2021) “Determination of Lignin Content in Plant Materials Using Solid-State ¹³C NMR Spectroscopy”, *Polymer Science – Series B*, vol. 63, no. 5. pp. 544–552.

Information about the authors

Sergey G. Kostryukov, Candidate of Chemistry Sciences, Associate Professor, Department of Organic Chemistry, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya st., Saransk, Russia, 430005), kostryukov_sg@mail.ru

Nikita A. Malov, student, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya st., Saransk, Russia, 430005), nik.malov.2020@bk.ru

Khusain B. Matyakubov, postgraduate student, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya st., Saransk, Russia, 430005), husin_518@mail.ru

Ivan A. Konushkin, student, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya st., Saransk, Russia, 430005), konushkinivan71@gmail.com

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 1 December 2021; approved after reviewing 22 December 2021; accepted 20 January 2022.